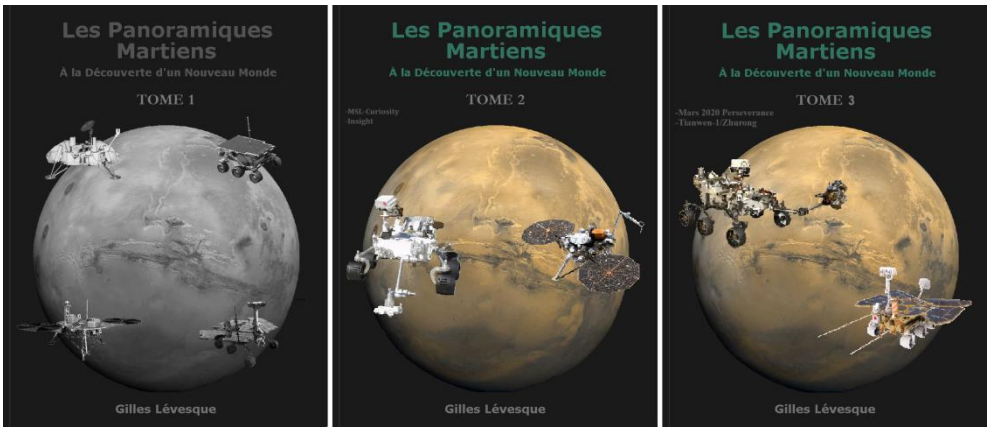
Les Panoramiques Martiens

À la Découverte d'un Nouveau Monde

TOME 1

Gilles Lévesque



Attribution - Pas d'Utilisation Commerciale - Pas de Modification 4.0 International

Les Panoramiques Martiens

À la découverte d'un nouveau monde

TOME 1

Gilles Lévesque
gilleslevesque98@gmail.com

Illustration de couverture :
Photo d'arrière plan : NASA/Viking 1 Orbiteur : 22-02-1980
Montage graphique de l'auteur

ISBN

© 2007-2035, ÉDITEUR

Le Code de la propriété intellectuelle interdit les copies ou reproductions destinées à une utilisation collective. Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite par quelque procédé que ce soit, sans le consentement de l'auteur ou de ses ayant cause, est illicite et constitue une contrefaçon, aux termes des articles L.335-2 et suivants du Code de la propriété intellectuelle.

Un merci tout spéciale aux magiciens de la retouche d'image de l'Ancien Forum UMFS (fermé et archivé sur Internet Archive en janvier 2025[1]) et autres :

Jan van Driel
Damia Bouic
James Canvin
Stuart Atkinson
Olivier de Goursac
E. Vandencbulek
JPL/the Pancam team Jim Bell
Jonathan Joseph
Bob Deen
D. Savransky
Elisabetta Bonora
Marco Faccin
James Sorenson
Don Davis
Iñaki Docio
Glen Nagle
L. Crumpler
Mark Lemmon
Marco Di Lorenzo
Ken Kremer
Elaina McCartney
Philip J. Stooke
Eduardo Tesheiner
Emily Lakdawalla
M. Howard
D. Crotty
Calvin J. Hamilton
Jason Davis

[1] https://umsfarchive.com/index.php/index.php

SOMMAIRE

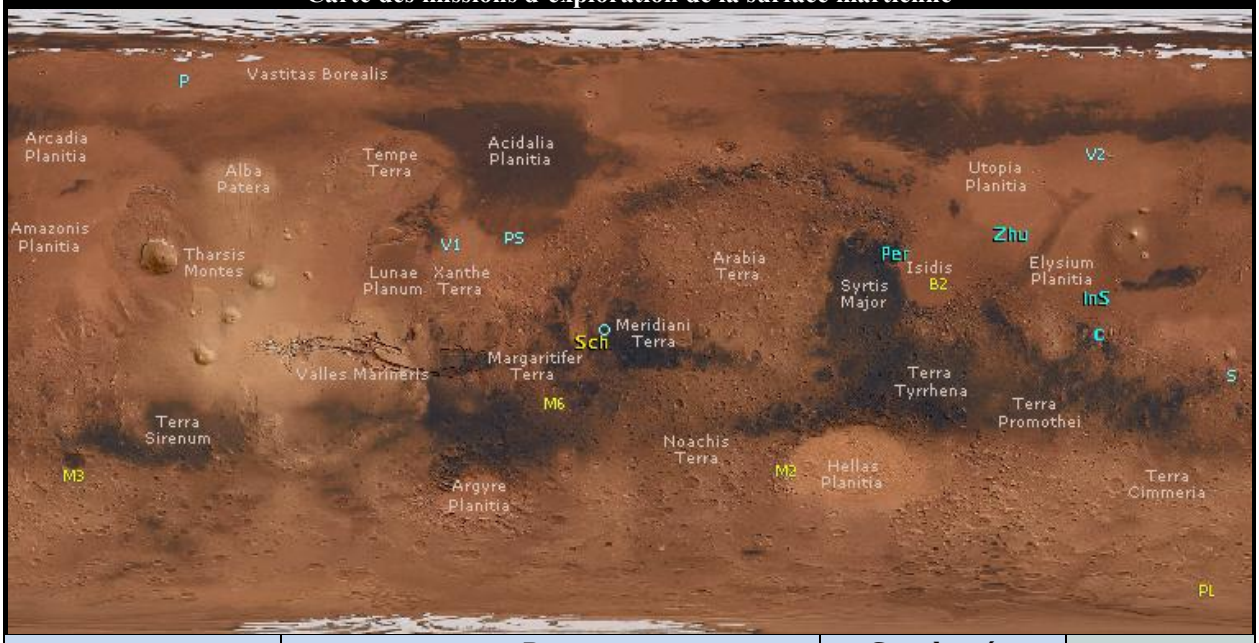
Introduction **1**
Les Panoramiques des Vikings **9**
Le Départ de Viking 1 **12**
Mini Laboratoire et Expériences de Microbiologie **14**
Les Panoramiques de Viking 1 **22**
Les Panoramiques de Viking 2 **27**
Les Panoramiques de Pathfinder **35**
Les Panoramiques de Spirit **49**
En route vers le Cratère Bonneville **53**
De Bonneville à West-Spur **67**
De West-Spur au Sommet **77**
Du Sommet à Home Plate **95**
L'épopée de Home Plate **101**
Les Panoramiques d'Opportunity **121**
En route vers Endurance **133**
De Endurance à Victoria **147**
L'épopée autour de Victoria **161**
De Victoria à Endeavour **173**
Cape York **189**
Vers Solander Point **203**
Bilan de santé du rover **205**
La Dixième Année (Cape Tribulation) **211**
Marathon Valley **225**
Vers Cape Byron **237**
Les Panoramiques de Phœnix **243**
Annexe **267**
Références Web **285**

INTRODUCTION

Ce livre relate l'histoire des six premières missions d'explorations spatiales qui ont réussi à se poser en douceur à la surface de la planète Mars, et qui ont été capables par la suite de remplir avec succès les différents objectifs de leurs missions. Les quatre missions suivantes, soit MSL-Curiosity, InSight, Mars 2020 Perseverance et Tianwen-1 Zhùróng seront traitées dans le tome 2 et 3. Il s'agit d'une extraordinaire aventure humaine qui a grandement contribué à changer notre vision de l'histoire géologique de la planète rouge, et qui nous a dévoilé pour la première fois à quoi pouvait bien correspondre la surface d'un autre Monde. Les atterrisseurs (lander) et les astromobiles (rover) qui ont exploré la surface martienne, nous ont fait parvenir de magnifiques clichés panoramiques qui nous ont dévoilés le visage de la planète à travers six sites d'atterrissages différents. Ce livre utilise ces clichés sous la forme d'un album souvenir, afin de décrire de manière chronologique le déroulement et les différentes découvertes scientifiques de chaque mission. Les découvertes scientifiques exposées dans ce livre sont basées sur les documents de chaque équipe ayant participé à ses missions de la NASA, ainsi que plusieurs autres publications d'études sur le sujet. L'analyse in situ de l'altération chimique et minéralogie des roches et des échantillons récoltés sur le sol martien, ainsi que l'étude des différentes strates géologiques rencontrées sur les sites d'atterrissages ou sur le parcours des différents astromobiles, nous permet entre autres de retracer le contexte historique et de mieux comprendre l'évolution de la planète Mars à travers ses différentes époques géologiques.

L'exploration in situ du sol martien a été effectuée en plusieurs étapes entre les années 1960 et 2008, et elle faisait suite à la première tentative réussie de la mise en orbite d'une sonde spatiale autour de la planète. Le début de l'exploration spatiale de la planète Mars a été marqué de plusieurs échecs, soit par l'explosion au décollage des fusées porteuses russes au début des années 1960, ou par la perte du signal de télécommunication avec les sondes durant leurs trajets vers Mars (Figure 2). Dans un deuxième temps, il y a eu le premier survol réussi de la planète qui a été effectuée par la sonde américaine Mariner 4 le 14 juillet 1965. Lors de son unique passage à proximité de la planète, la sonde a eu le temps de prendre et de transmettre vers la Terre les toutes premières images de la planète rouge, soit un total de 22 images qui couvraient environ 1% de la surface martienne. L'exploration spatiale de Mars va se poursuivre quatre années plus tard, avec la sonde américaine Mariner 6 qui a frôlé la planète le 31 juillet 1969, soit 10 jours après l'événement historique du premier pas de l'homme sur la lune lors de la mission Apollo 11. Durant son unique survol rapproché de la planète, qui s'est effectué sur une trajectoire équatoriale, la sonde a pris 76 images qui incluent 50 plans éloignés du globe martien et 26 plans rapprochés de la surface de la planète. Six jours plus tard (5 août), ce fut le tour de la sonde américaine Mariner 7 à faire un survol rapproché de la planète Mars, qui s'est effectué cette fois-ci sur une trajectoire polaire. La sonde a eu le temps de transmettre vers la Terre un totale de 126 images, soit 93 nouveaux plans éloignés du globe martien et 33 nouvelles prises de vue rapprochées de la surface.

Carte des missions d'exploration de la surface martienne



Mission	Date				Coordonnées		Site d'atterrissage
	Départ	Arrivés	Fin	Durée (Sols-Jours)	Latitude	Longitude	
Les Missions Réussies							
Viking 1 (V1)	20-08-1975	20-07-1976	13-11-1982	2246 – 2306	22,27° N	47,95° W	Chryse Planitia
Viking 2 (V2)	09-09-1975	03-09-1976	11-04-1980	1281– 1316	47,64° N	134,29° E	Utopia Planitia
Pathfinder (PS)	04-12-1996	04-07-1997	27-09-1997	83 – 85	19,33° N	33,55° W	Ares Vallis
Spirit (S)	10-06-2003	04-01-2004	22-03-2010	2210 – 2269	14,57° S	175,47° E	Gusev Crater
Opportunity (O)	08-07-2003	24-01-2004	10-06-2018	5111 – 5250	1,95° S	5,53° W	Meridiani Planum
Phœnix (P)	04-07-2007	25-05-2008	02-11-2008	157 – 160	68,22° N	125,75° W	Vastitas Borealis
MSL Curiosity (C)	26-11-2011	06-08-2012	------	–	4,5 S	137,44° E	Gale Crater
InSight (InS)	05-05-2018	26-11-2018	15-12-2022	1440 – 1480	4,5 N	135,62° E	Elysium Planitia
Mars 2020/Perseverance (Per)	30-07-2020	18-02-2021	------	–	18,45° N	77,45° E	Jezero Crater
Tianwen-1/Zhurong (Zhu)	23-07-2020	14-05-2021	18-05-2022	359 – 369	25,1° N	109,9° E	Utopia Planitia
Les Missions Échouées							
Mars 2 (M2)	19-05-1971	27-11-1971			45° S	47° E	Hellas Planitia
Mars 3 (M3)	28-05-1971	02-12-1971			45° S	158° W	Ptolemaeus Crater
Mars 6 (M6)	05-08-1973	12-03-1974			23,9° S	19,42° W	Margaritifier Sinus
Mars Polar Lander (MPL)	03-01-1999	03-12-1999			76° S	165° E	Planum Australe
Beagle 2 (B2)	02-06-2003	25-12-2003			11,53° N	90,43° E	Isidis Planitia
ExoMars/Schiaparelli (Sch)	14-03-2016	19-10-2016			2,05° S	6,21° W	Meridiani Planum

L'orbiteur américain Mariner 9, après la perte de Mariner 8 lors du lancement, a été la première sonde d'exploration spatiale à réussir avec succès des manœuvres d'insertions orbitales autour de la planète Mars le 14 novembre 1971. C'était également la première fois dans toute l'histoire de l'exploration spatiale, qu'une sonde se mettait en orbite autour d'une autre planète. Durant le long trajet de 167 jours de Mariner 9 vers Mars, une vaste tempête de poussières globale s'était levée dans la région de « Noachis Terra » le 22 septembre 1971 qui masquait toute la surface de la planète. Mariner 9 doit attendre encore un mois et demi avant que la tempête se calme et de pouvoir envoyer les premières photos de la surface de Mars le 2 janvier 1972. La mission initialement prévue pour une durée de 90 jours, a cependant dépassé très largement cette longévité en fonctionnant correctement pendant plus de 349 jours, soit presque quatre fois plus que l'estimation initiale. La perte de la sonde a été causée par l'épuisement du gaz (azote) qui servait à la stabilisation de l'altitude de son orbite. N'ayant plus les moyens de corriger les

Calendrier des saisons martiennes – HN hémisphère nord, HS hémisphère sud			
Equinoxe	**Solstice**	**Equinoxe**	**Solstice**
Printemps HN Automne HS	**Été HN Hiver HS**	**Automne HN Printemps HS**	**Hiver HN Été HS**
5 mars 2004	20 septembre 2004	23 mars 2005	17 août 2005
22 janvier 2006	8 août 2006	8 février 2007	5 juillet 2007
10 décembre 2007	25 juin 2008	26 décembre 2008	22 mai 2009
27 octobre 2009	13 mai 2010	13 novembre 2010	9 avril 2011
14 septembre 2011	30 mars 2012	30 septembre 2012	24 février 2013
1er août 2013	15 février 2014	18 août 2014	12 janvier 2015
19 juin 2015	3 janvier 2016	5 juillet 2016	29 novembre 2016
6 mai 2017	20 novembre 2017	23 mai 2018	17 octobre 2018
24 mars 2019	8 octobre 2019	9 avril 2020	3 septembre 2020
8 février 2021	25 août 2021	25 février 2022	22 juillet 2022
27 décembre 2022	13 juillet 2023	13 janvier 2024	8 juin 2024
12 novembre 2024	29 mai 2025	29 novembre 2025	25 avril 2026

dérives orbitales, la sonde fut désactivée le 27 octobre 1972 et elle devrait percuter le sol martien vers l'année 2022. La mission fut dans son ensemble une très grande réussite, avec une collecte de 7 329 images de la planète et de ses deux lunes : Phobos et Deimos. Les images de Mariner 9 nous ont dévoilés pour la toute première fois les merveilles géologiques qui se cachaient à la surface de la planète, comme par exemple l'énorme volcan bouclier « Olympus Mons » de 27 km d'altitude, la grande faille géologique « Valles Marineris » de 4 000 km de long sur près de 200 kilomètres de large dans certaines régions et par 7 kilomètres de profondeur, ainsi que plusieurs chenaux d'inondations et vallées de débâcles. Les données transmises lors de cette mission ont permis de mieux connaître les différentes conditions physiques qui règnent à la surface de la planète, tout en donnant l'occasion aux ingénieurs et aux techniciens de la NASA de mieux comprendre les technologies nécessaires pour mener à bien de long voyage interplanétaire vers Mars. Les images transmises par la sonde Mariner 9 ont également permis de dresser la toute première carte complète de la planète (85%), qui sera utilisée plus tard pour identifier les futurs sites d'atterrissages des prochaines missions d'exploration spatiale qui seront dirigées vers la surface martienne.

Les Américains vont se lancer dans l'exploration de la surface martienne à partir de 1968, en mettant sur pied le très ambitieux programme Viking. Les débuts de l'exploration spatiale de la surface de la planète Mars ont été très difficiles, et les premières tentatives russes se sont soldées par des échecs avec la perte successive des sondes Mars 2 et Mars 3, le 27 novembre et le 2 décembre 1971, suivit deux années plus tard par les sondes Mars 6 et Mars 7 le 12 et le 9 mars 1974. Les sondes Mars 2-3 et 6 ont été les premiers engins construits par l'homme à s'écraser à la surface de la planète rouge (voir la carte des missions d'explorations de la surface martienne). Le programme américain de l'exploration spatiale de la surface de la planète rouge va aboutir en 1976 avec la réussite des deux missions Vikings, qui nous ont alors offerts pour la première fois de magnifiques clichés panoramiques de paysage martien se trouvant à la surface de la planète. Le programme Viking sera par la suite suivi par la mission de démonstration technologique Mars Pathfinder en 1997, des missions géologiques MER (Mars Exploration Rover) composées des robots Spirit et Opportunity en 2004, par la mission Phœnix en 2008 et par la mission Curiosity en 2012 (traité dans le Tome 2). La mission des robots Spirit et Opportunity était axée sur l'analyse de la composition chimique et minéralogique du sol et des roches, dans le but de faire

Tableau des Ères géologiques martiennes			
Chronologie basée sur la taille et le nombre des cratères d'impacts sur la planète Mars. (Scott et Carr., 1978 et Jakosky et Phillips, 2001)		**Chronologie basée sur la minéralogie fait à partir des données fournies par l'instrument OMEGA de Mars Express. (Bibring, et al., 2006)**	
Ère (Ga)	**Description**	**Ère (Ga)**	**Description**
Noachien 4,6 à 3,5	Forte activité volcanique avec la formation du dôme de Tharsis et des vallées ramifiées du sud. Une atmosphère plus dense et plus chaude qui favorise l'écoulement de l'eau à la surface. Le bombardement de météorite reste encore intense. (Noachien Terra)	**Phyllosien** 4,5 à 4,2	L'ère des phyllosilicates hydratés et des argiles avec une atmosphère plus dense et une température de surface plus clémente favorisant l'écoulement de l'eau à la surface de la planète durant plus de 300 Ma. Le bombardement de météorite reste encore intense.
Hespérien 3,5 à 2,0	Formation des chenaux de débâcles dans les régions chaotiques et progression du soulèvement du dôme de Tharsis avec la formation des réseaux de canyons de Valles Marineris. (Hespérien Planum)	**Phase de transition**	Soulèvement du dôme de Tharsis et pic de l'activité volcanique avec émission d'une grande quantité de soufre avec l'altération acide des sols. Chute drastique de la pression atmosphérique.
Amazonien 2,0 à 0	L'activité volcanique diminue, avec une augmentation de l'érosion éolienne dans un environnement plus sec propice à la formation des oxydes de fer, formation de la partie supérieure du volcan Olympus. (Amazonien Planitia)	**Theiikien** 4,2 et 3,8	Arrêt de la dynamo martienne et début de l'ère des sulfates avec pics de l'activité volcanique de plaine (failles), et formation de Valles Marineris.
		Siderikien 3,8 à 0	L'ère des oxydes ferriques avec une atmosphère plus sèche propice à la formation des oxydes de fer.

une étude sur la durée de l'action corrosive de l'eau. La mission Phoenix avait pour objectif d'étudier les indices de la présence de l'eau sous toutes ses formes, afin d'évaluer le potentiel d'habitabilité à la surface de la planète, que Curiosity complétera par la suite avec des analyses chimiques et minéralogiques plus poussées, portées sur l'indice d'altération et d'hydratation d'échantillons de sol et de roches qui auront été recueillis plus en profondeur dans le sous-sol martien, avec en prime la recherche de composés carbonatés et organique.

La grande réussite des missions américaines dans l'exploration spatiale de la surface martienne, face aux échecs successifs des missions Russes, qui vont cependant se reprendre plus tard dans l'exploration de Vénus, vient principalement du fait que les Américains ont adapté l'équipement de leurs sondes spatiales aux rudes conditions de navigation dans l'espace, contrairement aux Russes qui se contentait uniquement de pressuriser l'équipement de leurs sondes à l'intérieur de modules hermétiques. Les sondes américaines étaient également programmables à distance tout au long de leurs missions, contrairement aux sondes soviétiques qui étaient programmées uniquement avant leur départ et qui naviguaient par la suite en aveugle. Cet avantage technologique a permis aux Américains de faire face à des conditions de navigation imprévues, comme celles rencontrées lors de la mission de Mariner 9.

Les données recueillies par les six missions américaines qui ont atterri avec succès à la surface de la planète rouge, nous ont permis de mieux comprendre l'histoire géologique passée et présente de la planète Mars (voir le tableau sur les Ères géologiques martiennes). Les indices d'altérations minéralogiques trouvés par les quatre atterrisseurs (Viking 1-2, Pathfinder et Phœnix) et par les trois astromobiles (Sojourner, Spirit et Opportunity) sur la présence passée et prolongée de l'écoulement d'une certaine quantité d'eau à la surface de la planète. Semble

indiquer qu'il y a eu à l'occasion dans l'histoire récente de la planète des épisodes d'écoulements d'une faible quantité d'eau à sa surface, mais qui aurait été beaucoup plus abondante à une époque plus précoce. Un écoulement qui aurait cessé très tôt dans l'histoire de la planète, mais qui à l'occasion sortirait localement du sous-sol par des failles lors d'activités géologiques, volcaniques et météoritiques et par des cycles climatiques de longue durée (cycles astronomique de Milankovitch). La compréhension de l'histoire géologique martienne a également été obtenue grâce aux données fournies par les sondes orbitales suivantes : Mars Globale Surveyor (MGS), Mars Odyssey, Mars Express et Mars Reconnaissance Orbiter (MRO).

L'altération des roches par le soufre découvert par les rovers Spirit et Opportunity, indique qu'il a déjà existé une certaine activité corrosive dans le passé de Mars. Celle-ci aurait été causée par l'écoulement d'une faible quantité d'eau chaude et acide à la surface de la planète, qui aurait réagi avec les gaz libérés dans l'atmosphère martienne lors d'épisodes d'éruption volcanique (Theiikien) avant d'altérer par la suite la composition chimique des roches. La grande quantité d'olivine d'origine basaltique et volcanique dans les terres basses du nord, qui est un minéral très instable en présence d'eau, indique également que cet écoulement épisodique a été très localisé et de très courte durée à une époque plus tardive. Les données fournies par la sonde Phœnix indiquent très clairement que la vie aurait pu exister au tout début de l'histoire martienne, quand l'eau était beaucoup plus abondante à sa surface favorable à la formation des argiles, et qu'elle pourrait toujours subsister de nos jours sous la forme des pores endormies enfouies dans les profondeurs de la planète, et qui attendrait par exemple des moments plus propices pour se réveiller ? Il existe sur Terre des formes de vie extrêmophile de type chimiotrophe qui tirent leur énergie de composés chimiques, et qui utilisent comme source de nourriture des matériaux très oxydants comme le perchlorate découvert par la sonde Phœnix en 2008. D'autres organismes extrêmophiles (bactéries et archées) sont très résistants aux températures basses (psychrophiles), tandis que d'autres sous forme de spores peuvent résister au voyage spatial, ou encore sont très résistants aux radiations ionisantes.

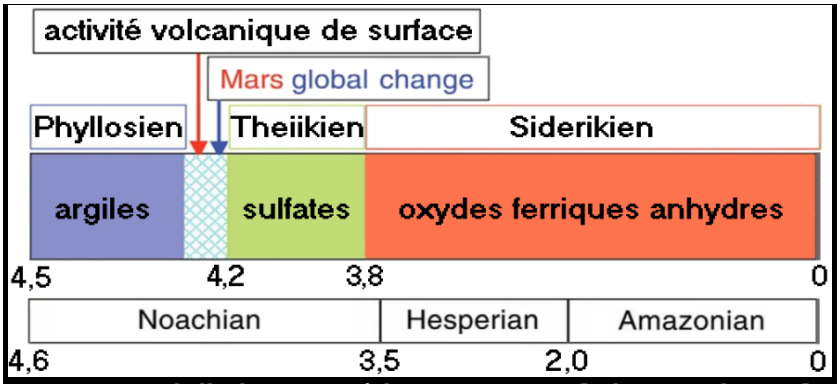


Figure 1 : Echelle des temps géologiques martiens [Bibring, et al., 2006]

Mais avant d'aller plus loin sur les possibilités de la vie martienne passée et présente, comme semble le suggérer le retour du débat autour de la météorite ALH 84001 parue dans un article de la revue Scientific American le 26 novembre 2009. Il faudra attendre les résultats des prochains programmes d'exploration spatiale de la surface de la planète Mars, qui seront effectuées entre autre par les missions américaine MSL-Curiosity (Tome 2) et Mars 2020 avec l'astromobile Perseverance (Tome 3) (première phase de l'ambitieux projet américain de retour d'échantillon : Mars Sample Return). Et par le vaste programme européen Exomars composé de

deux missions, soit ExoMars 2016 composée de l'orbiteur Trace Gas Orbiter (TGO) et de l'atterrisseur expérimental Schiaparelli (2016), suivi par l'ambitieuse mission ExoMars 2028 avec l'astromobile Rosalind Franklin prévu vers 2028 muni d'une foreuse capable d'extraire et d'analyser des échantillons extraits du sous-sol martien jusqu'à 2 mètres de profonde. Ses missions ont comme objectif principal de faire des expériences d'exobiologie à la recherche de molécules organiques, et de chercher des traces de vie passée ou présente sous la surface de Mars. Après avoir suivi la piste de l'eau, il est temps maintenant de suivre la piste du vivant.

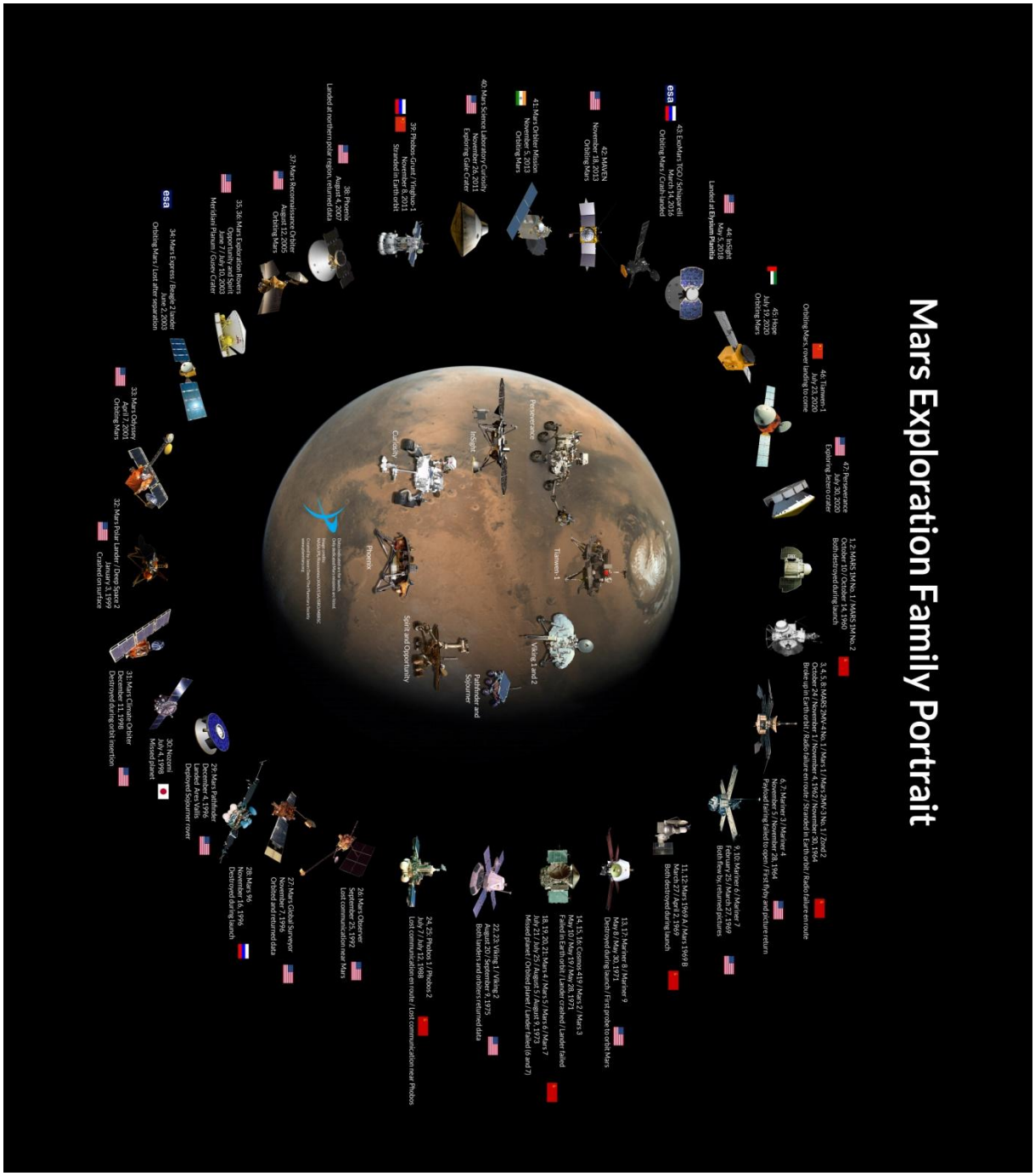


Figure 2 : Portrait de famille de l'exploration Martienne.
(Crédit : NASA/Roscosmos/JAXA/ESA/ISRO/Created by Jason Davis)

Vous pouvez retrouver les montages et les cartes de l'auteur sur le site flickr de partage de photos et de vidéos suivant :
https://www.flickr.com/photos/197507863@N02/

LES PANORAMIQUES DES VIKINGS

Le programme Viking créé en décembre 1968 fut une très grande réussite scientifique et technique, en plus de donner un nouvel élan dans l'exploration spatiale de la planète Mars. Le programme a pris fin abruptement en novembre 1982, par la perte définitive du contact avec le module d'atterrissage de Viking 1, qui était alors à la surface de la planète rouge depuis plus de 6 ans et 116 jours (ou 2 246 Sols en mesure de temps martien). Une longévité record que Viking 1 va conserver pendant plus de 28 ans. Le programme Viking était composé de deux missions d'explorations interplanétaires identiques : Viking 1 et Viking 2. Les sondes Vikings étaient constituées de deux parties qui étaient reliées entre elles durant le long voyage interplanétaire vers Mars. Les sondes Vikings étaient composées d'un module d'atterrissage (lander) et d'un module orbiteur qui était basé sur le modèle de Mariner 9 (Figure 2 et 3). Les orbiteurs servaient dans un premier temps de module de transport, qui était responsable de la longue croisière dans le vide spatial jusqu'à Mars, et ils étaient destinés par la suite à rester en orbite autour de la planète rouge pour prendre des images et de servir de relais de communication entre les atterrisseurs et la Terre. Les communications avec la terre se faisaient grâce à deux antennes, soit une antenne parabolique orientable à grand gain de 1,5 mètre de diamètre, et d'une antenne omnidirectionnelle à faible gain. Les bandes de fréquence radioélectrique des micro-ondes S (2,2 Ghz) et X (8,2 Ghz) étaient utilisées, et la communication avec les atterrisseurs se faisait grâce à un relais radio UHF de 381 Mhz. Les atterrisseurs avaient la délicate tâche de se poser en douceur à la surface de la planète Mars, et ils étaient équipés de différents instruments scientifiques pour analyser le sol et l'atmosphère martienne. Le programme Viking a coûté un peu plus de 3,8 milliard de dollars en tout, un coût qui était considérable pour l'époque, mais dont les données et les images transmises ont changé de façon radicale notre vision de Mars.

Figure 1 : Lancement de Viking 1 (à gauche) et de Viking 2 (Crédit : NASA/JPL)

La mission des Vikings était double, elle consistait à faire une étude plus détaillée du sol et de l'atmosphère de Mars, et dans un deuxième temps de poursuivre la cartographie de la planète rouge. La cartographie de Mars avait déjà été initiée par les sondes Mariner 4-6-7 et 9

Figure 2 : L'orbiteur des Vikings

Figure 3 : L'atterrisseur des Vikings

(Crédit : NASA/NSSDC-JPL)

(premier engin en orbite autour d'une autre planète) entre les années 1965 et 1971, et celle-ci devenait de plus en plus essentielle pour trouver les futurs sites d'atterrissages des prochaines missions d'explorations qui seront dirigées vers la surface de la planète. La sonde Mariner 4 lancée en novembre 1964, fut la première mission d'exploration spatiale à réussir sa mission vers Mars, et elle nous a transmis 22 images lors de son unique survol de la planète qui ne dura que 26 minutes. Le module de descente de la sonde soviétique Mars 2 lancé en mai 1971, fut le premier engin spatial construit par l'homme à s'écraser à la surface de la planète Mars le 27 novembre 1971. Un mois plus tard, la sonde soviétique Mars 3 qui a été lancée neuf jours après Mars 2, à bien réussit à se poser en douceur à la surface de la planète le 2 décembre 1971, mais le contact radio a aussitôt été perdu par la suite. La planète Mars subissait une gigantesque tempête de poussière qui recouvrait toute la surface de la planète en 1971, ce qui peut expliquer la perte des sondes soviétiques qui naviguaient alors entièrement en mode automatique. La sonde soviétique Mars 6 allait subir le même sort en mars 1974, au moment où elle allait se poser à quelques mètres du sol tout juste avant la mise à feu de ses rétrofusées qui devaient contrôler sa descente. Les sondes Vikings de la grosseur d'une petite voiture avec une masse de 883 kg, ont été les premiers engins spatiaux construits par l'homme à remplir avec succès les différents objectifs de leur mission à la surface de la planète rouge, qui était de se poser en douceur à la surface et capable de transmettre des données vers la Terre.

Figure 3 b : Surface de Vénus vus par Venera 9
(Crédit : NASA/USSR Academy of Sciences)

Mars fut en réalité la deuxième planète du système solaire à recevoir la visite d'un engin spatial construit par l'homme. La mission spatiale qui a ouvert pour la première fois la route aux voyages d'explorations planétaires, fut la mission américaine Mariner 2 qui a frôlé la planète Vénus le 14 décembre 1962. Le premier engin spatial à atterrir à la surface d'une autre planète (en excluant la lune) a été la sonde soviétique Venera 7 le 15 décembre 1970, qui est resté fonctionnel pendant 23 minutes, soit 6 ans avant les sondes Vikings et juste un an avant la sonde Mars 2. La première photo prise à la surface d'une autre monde planétaire nous a été transmise par la sonde Venera 9 le 22 octobre 1975 (Figure 3:b), qui montrait pour la première fois à quoi pouvait bien correspondre le sol vénusien, soit plus de huit mois avant les premières images des atterrisseurs Vikings.

Le grand succès des missions Vikings a grandement contribué à la relance des différents programmes d'explorations spatiales de la planète Mars. Et pour la première fois dans toute

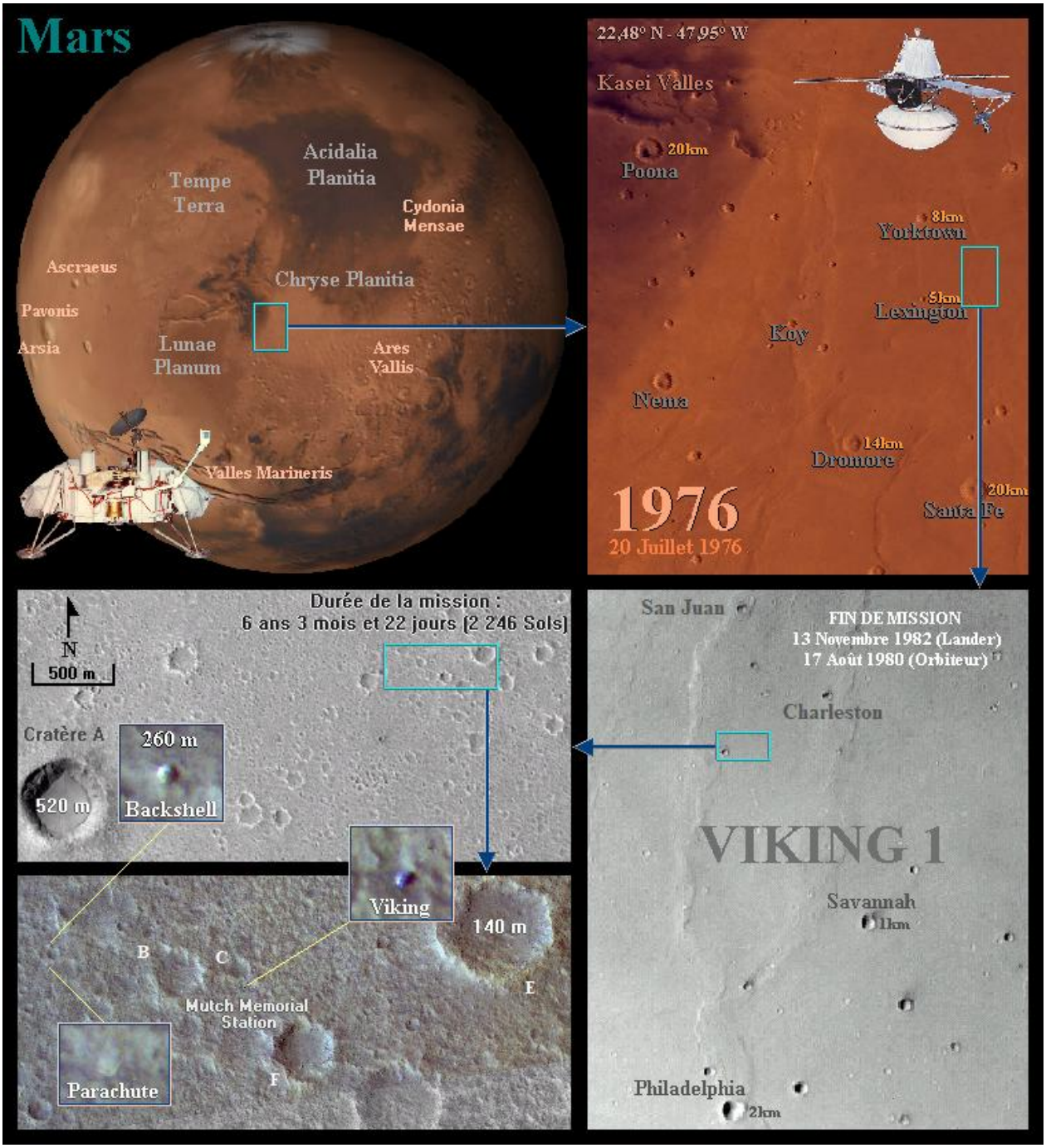


Planche 1 : Le site d'atterrissage de Viking 1 obtenu grâce aux données fournies par la caméra Hirise de Mars Reconnaissance Orbiter (MRO) en novembre 2006 (les 2 photos en bas à gauche). Les autres photos ayant participées au montage de cette maquette sont des orbiteurs Vikings des années 1976-77.

l'histoire de l'humanité, nous avions à notre portée de magnifiques clichés panoramiques de paysages martiens qui avaient été prises à partir de la surface de la planète. Les atterrisseurs Vikings nous ont fait parvenir des images qui ont été prises à partir de deux sites d'atterrissages différents, situés à plus de 6 725 kilomètres de distance l'un de l'autre. Une planète qui était encore bien étrange et qui était toujours remplie de mystère à cette époque. Désormais, planétologues, géologues et exobiologistes allaient avoir bien du travail sous la main pour les

décennies à venir, afin de traduire et de mieux comprendre les différentes données qui nous ont été transmises par les deux atterrisseurs Vikings.

LE DÉPART DE VIKING 1 :

Viking 1 fut lancé du centre spatial Kennedy à Cap Canaveral en Floride le 20 août 1975 par une fusée de type Titan III E-Centaur, suivi deux semaines plus tard par Viking 2 qui a été lancé le 9 septembre. Après un long voyage de plus de 10 mois dans le vide et les grands froids de l'espace, la sonde Viking 1 se place en orbite autour de la planète Mars le 19 juin 1976. Aussitôt arrivé sur place, l'orbiteur commence à prendre des clichés de la surface de Mars, afin de trouver et de pouvoir sélectionner différents sites pour le module d'atterrissage qu'il transporte. Le 20 juillet 1976, soit 31 jours après son arrivée autour de la planète rouge, l'atterrisseur reçoit enfin l'ordre de se séparer définitivement de son orbiteur, et d'amorcer doucement sa lente descente de 300 km vers la surface de Mars.

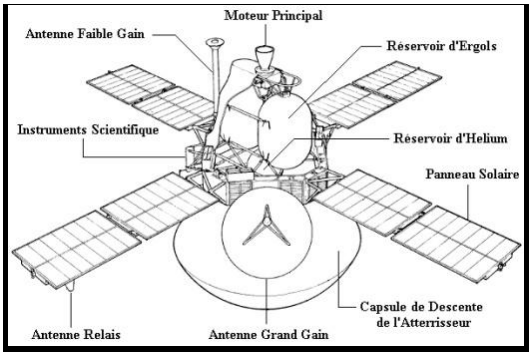


Figure 4 : Orbiteur des sondes Vikings

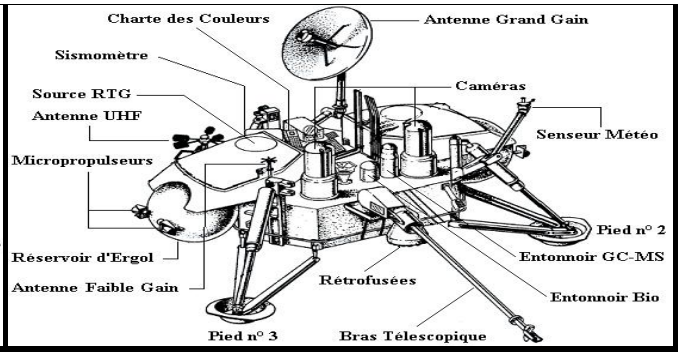


Figure 5 : Atterrisseur des sondes Vikings

(Crédit : NASA/JPL)

À 6 km d'altitude, l'atterrisseur déploie son parachute de seize mètres de diamètre et actionne par la suite ses trois rétrofusées à une altitude de 1,5 km, afin de freiner sa descente vers le sol martien. L'atterrisseur de Viking 1 va finir par se poser en douceur à la surface de la planète Mars à 16h13 MLT, heure locale de Mars (11h53 UTC : Temps Universel coordonné). Le premier cliché est pris 25 secondes plus tard (Figure 6), et il montre le pied nº 3 de l'atterrisseur qui est bien posé sur le sol martien. Cette première image de Mars ne sera reçue que 19 minutes plus tard, le temps à la transmission des données pour franchir à la vitesse de la lumière les 340 millions de kilomètres de distance qui séparaient la Terre de la planète Mars à cette époque. Viking 1 s'est posé dans la région ouest de la vaste plaine volcanique de « Chryse Planitia » (Plaine d'Or) à 22,48° de latitude Nord par 47,95° de longitude Ouest (Planche 1). L'orbiteur de Vikings 1 qui est resté en orbite autour de la planète va désormais prendre le relais pour transmettre vers la Terre les données et les images de l'atterrisseur au sol.

Les communications entre les atterrisseurs et les orbiteurs s'effectuent grâce à une antenne parabolique à grand gain, montée sur un mât orientable sur deux axes et émettant en Bande S (Figure 5). Une antenne omnidirectionnelle à faible gain émettant en Bande S était utilisée pour les communications radio directe avec le centre de contrôle sur Terre. Une antenne UHF pour les liaisons de proximité émettant sur 381 MHz était également installée pour jouer le rôle de relais

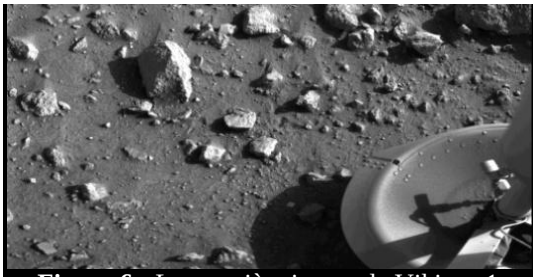


Figure 6 : La première image de Vikings 1
(Crédit : NASA/JPL, Viking 1 Lander)

avec les orbiteurs. Les atterrisseurs des sondes Vikings étaient également équipés de plusieurs instruments scientifiques très sensibles, qui leur permettaient de faire une quinzaine d'expériences scientifiques (Figure 5). Ils étaient également équipés de deux caméras panoramiques de haute définition (pour l'époque !), avec différents filtres couleur. Les caméras étaient espacées de 80 centimètres pour donner une vision stéréoscopique du terrain. Ses caméras ont permis de prendre les toutes premières images panoramiques à la surface de Mars, et elles nous ont dévoilé le magnifique paysage martien qui était situé tout autour des deux sites d'atterrissages. Les principaux objectifs des atterrisseurs étaient multiples : il consistait entre autre à faire l'étude géologique et minéralogique du sol et des roches, à analyser la composition chimique de l'atmosphère martienne, de surveiller l'activité sismique de la planète et à prendre des mesures régulières sur la pression, la température, la vitesse et la direction des vents. Tous ses instruments fonctionnaient correctement grâce à un petit générateur nucléaire isotopique (RTG, générateur thermoélectrique à radioisotope), capable de transformer en électricité la chaleur dégagée par la désintégration radioactive du plutonium 238 qui a une durée de demi-vie de 87,7 années. Les résultats des sismographes mirent en évidence une absence apparente de l'activité sismique sur Mars, et les analyses minéralogiques des roches ont dévoilé un sol très fortement oxydé avec un pourcentage élevé d'oxyde de fer (rouille). Les analyses chimiques de l'atmosphère ont confirmé qu'elle était très sèche et qu'elle contenait très peu de vapeur d'eau.

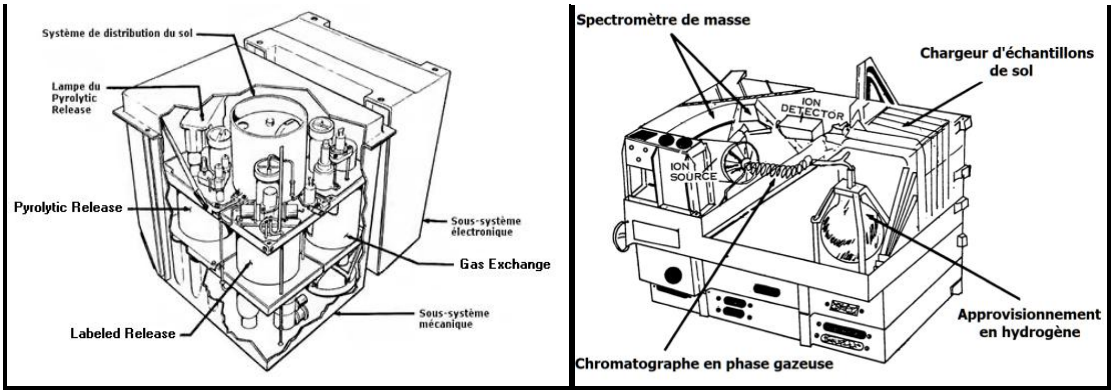


Figure 6 b : Mini laboratoire de microbiologie
(Crédit : NASA/JPL, Viking 1 Lander)

Il y avait également au menu trois petites expériences de microbiologie, qui étaient réservées à la recherche d'éventuelles traces de vie qui auraient pu exister à la surface de la planète Mars (*Pyrolytic Release*, *Gas Exchange* et *Labeled Release*). Ces trois expériences fortement miniaturisées montées à l'intérieur de la structure de l'atterrisseur, ont été effectuées sous différents protocoles expérimentaux avec des durées d'incubations très différentes. Cette démarche avait pour but de fournir des données de comparaisons pour vérifier le comportement des milieux de culture soumis à différentes situations. Un total de deux échantillons par site d'atterrissage ont été analysés à plusieurs reprises et sous différents protocoles. Pour mener à bien ces expériences biologiques, les sondes Vikings ont été équipées d'un mini laboratoire de microbiologie qui contenait trois chambres de culture différentes, soit une pour chaque type d'expériences (Figure 6:b). Un chromatographe à pyrolyse en phase gazeuse couplée à un

spectromètre de masse (GC/MS) était utilisé pour analyser et identifier les gaz émis lors de ces expériences. Le chromatographe en phase gazeuse (GC) est muni d'un petit four qui vaporise et trie les composés volatils d'un mélange dans une colonne qui défini un temps de rétention (phase stationnaire), et le spectromètre de masse (MS) ionise puis trie l'échantillon selon la masse et la charge qui est accéléré par un champ électrique et soumise à l'intensité d'un champ magnétique ajustable qui fait dévier leur trajectoire qui est ensuite analysé pour identifier la composition moléculaire et isotopique. En plus des expériences de biologie, cet instrument (GC/MS) avait également pour tâche de mener à bien des analyses chimiques du sol martien, dont les échantillons pouvaient êtres chauffés progressivement à l'un des quatre paliers de température (50, 200, 350 ou 500 °C). En plus du GC/MS, les atterrisseurs étaient équipés d'un spectromètre à fluorescence rayon X (XRFS) pour faire l'analyse minéralogique du sol martien. Le spectromètre XRFS fonctionne en bombardant une cible avec des atomes radioactifs (^{55}Fe, ^{109}Cadium), et analyse ensuite le rayonnement X qui est émis par la cible. Plusieurs tranchées seront creusées tout au long de la missions des Vikings, dans le but de récolter des échantillons pour les expériences de biologies et pour les analyses chimique du sol effectuées par le GC/MS et le spectromètre XRFS. Les sondes Vikings ont été les premières missions d'exploration spatiale à mener des expériences d'exobiologie à la surface d'une autre planète (voir l'annexe).

MINI LABORATOIRE ET EXPÉRIENCE DE MICROBIOLOGIE :

***Pyrolytic Release (PR)* :** Un échantillon du sol martien collecté dans les dix premiers centimètres par le bras télécommandé de l'atterrisseur équipé d'une petite pelle à son extrémité, est placé à l'intérieur d'une chambre de culture durant 5 jours. La chambre est par la suite remplie de gaz carbonique radioactif (CO_2 + CO marqué au carbone 14), et l'échantillon est ensuite éclairé par une lampe électrique au xénon durant une période d'incubation variable. Des expériences avec lampe éteinte ont été faites par Viking 2 pour servir de groupe témoin stimulant l'obscurité. L'éclairage au xénon sert à imiter les effets de la lumière solaire tout en atténuant les effets des rayons ultraviolets que subit le sol martien en temps normal, et qui détruisent toute forme de vie se trouvant immédiatement en surface. Si des organismes vivants sont enfouis à quelques millimètres ou centimètres dans le sol martien, ils sont capables d'extraire le carbone contenu dans le CO_2 de l'atmosphère par une sorte de mécanisme relié à la photosynthèse (organisme autotrophe). Il est alors permis de penser que ces micro-organismes vont assimiler le carbone radioactif qui est contenu dans la chambre du mini laboratoire.

Figure 7 : Tranchée creusée par Viking 2 (Crédit : NASA/JPL/Viking 2 Lander)

Après un certain temps d'incubation, on retire toute l'atmosphère de la chambre de culture par un jet d'hélium, et on chauffe très fortement l'échantillon jusqu'à 625 °C (pyrolyse). La température du four était également ajustable selon le type d'expérience désirée. Dans ses conditions de température extrême, les molécules organiques passent directement de l'état solide à l'état gazeux par sublimation, la chaleur intense du four va tuer et vaporiser tous les micro-organismes. Les vapeurs produites sont ensuite introduites dans le tube de rétention du chromatographe, ou elles sont mixées avec un gaz inerte (hydrogène, hélium, azote, argon)

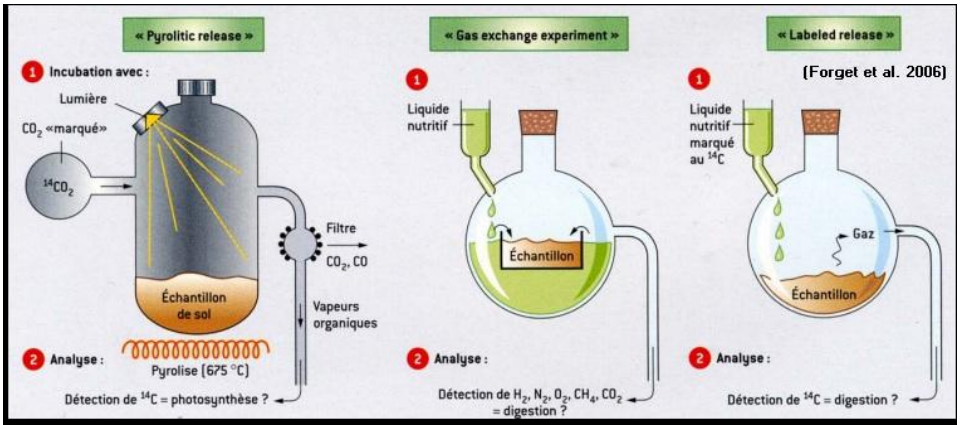


Figure 7b : Expériences de biologie des Vikings (Crédit : Forget et al. 2006)

qui sert de gaz porteur à travers l'appareil. La partie interne du tube est imprégnée d'une substance chimique active (phase stationnaire), qui sert à fractionner les gaz volatiles de l'échantillon selon différents indices d'affinités. L'échantillon est ensuite porté progressivement à 200 °C à un taux de 8,3 °C par minute. Les différents paliers de température permettent de trier les molécules organiques selon leur masse durant le dégazage. Le gaz émis (H_2, N_2, CO_2, O_2, CH_4) est ensuite identifié par le spectromètre de masse, qui est capable de mesurer les différentes concentrations moléculaires et isotopiques de CO et de CO_2. Le ^{14}C étant plus lourd que le ^{12}C naturel, il sera moins dévié par le champ magnétique du spectromètre de masse. Ce qui permet à l'instrument d'identifier les molécules à partir de leurs masses molaires, avec une sensibilité capable de distinguer les isotopes du carbone. Cette expérience avait pour objectif de faire ressortir le taux d'assimilation du carbone radioactif par d'éventuels micro-organismes photosynthétiques vivants dans le sol martien, et qui auraient été sensibles à la lumière. Deux expériences ont servi de témoin parmi les dix qui ont été réalisées au total (Viking 2, Sol 8 et 51), et qui n'ont pas été soumises à la source d'éclairage. Les expériences témoin servaient à vérifier l'importance de la lumière dans les réactions chimiques observées (voir l'annexe).

Les résultats de l'expérience *Pyrolytic Release*[2] (Date de collecte Viking 1 : Biologie 1 au Sol 8, Biologie 2 au Sol 31, Biologie 3 au Sol 36 et Biologie 4 au Sol 91, et pour Viking 2 : Biologie 1 au Sol 8, Biologie 2 au Sol 28 et Biologie 3 au Sol 51) ont été négatifs pour la recherche d'organisme vivant autotrophe dépendant de la lumière. Il a bien eu une détection d'émission de carbone radioactif dans 7 expériences sur les 9 qui ont été réalisées, mais les expériences des échantillons témoin avec la lampe éteinte faisaient partie du lot des résultats positifs. Ce qui invalidait l'approche de la synthèse de composé organique par des organismes vivants autotrophes dépendants de la lumière. Le sol martien restait chimiquement très réactif même sans trace de vie, et toujours capable d'absorber du CO_2 à partir d'une chimie minérale de type oxydante.

***Gas Exchange* (GEX) :** L'expérience de l'échangeur de gaz comportait trois options expérimentales : le mode mouillé, le mode humide et le groupe témoin ou le sol est analysé sans apport d'eau ou de solution nutritive. L'expérience *Gas Exchange* avait pour objectif d'analyser les échanges de gaz émis lors du métabolisme relié à la respiration d'éventuel micro-organisme contenue dans les échantillons de sol martien. Dans cette expérience les échantillons sont placés

[2] Viking's search for life on Mars, David Darling

en présence d'une atmosphère qui simule les principales caractéristiques chimiques de l'atmosphère martienne (CO_2, hélium, krypton) avec des périodes d'incubation variable. Le mode mouillé consistait à présenter directement l'échantillon à une culture nutritive contenant des acides aminés, des vitamines, des composés organiques, de l'eau et des sels inorganiques. Dans le mode humide l'échantillon était humidifié avec de l'eau durant une certaine période, dans l'objectif d'aider à relancer l'activité métabolique d'éventuel micro-organisme en sommeil avant d'être présenté à une substance nutritive. Le gaz au-dessus de l'échantillon est ensuite prélevé et analysé à différentes reprises par le GC/MS. L'analyse de l'échantillon durait 200 jours, période durant laquelle différents protocoles ont été expérimentés. *(Viking 1&2 au Sol 8)*

Cette expérience avait pour objectif de rechercher d'éventuelles traces de micro-organismes avec un métabolisme de type hétérotrophe, qui vivent de composés organiques déjà présents dans le milieu, par l'analyse des échanges gazeux reliés à leur respiration. Des échantillons de sol ont également été stérilisés par chauffage avant leur introduction dans la chambre d'incubation pour servir d'échantillon témoin. Cette expérience a permis de constater que dans tous les cas où l'échantillon était humidifié (incluant les échantillons témoins stérilisés), il avait une forte émission d'oxygène sur une période de temps très brève (2h30 min), avec un taux plus faible de dégagement de CO_2 et d'azote (N). Ce dégagement n'était pas reproduit par la suite, même si l'échantillon était de nouveau humidifié ou présenté de nouveau à une culture nutritive. Les résultats observés dans le mode mouillé (incluant l'échantillon témoin stérilisé) ont été moins violents que dans le cas du mode humide, avec une petite émission d'oxygène et de CO_2 au début, suivi par la suite d'une lente émission continue de CO_2. Cette expérience suggère très fortement la présence d'une chimie minérale capable d'assimiler le carbone radioactif, qui serait très réactif en présence d'eau et qui impliquerait des substances oxydantes contenues dans les échantillons du sol martien.

***Labeled Release (LR)* :** Cette expérience était un peu différente de la précédente (GEX), et elle avait pour objectif de vérifier si des organismes vivants se nourrissaient du carbone radioactif qui était contenu dans la matière organique de la substance nutritive, contrairement à l'expérience de *Gas Exchange* qui n'utilisait pas de marquage radioactif. Dans cette expérience, un échantillon de sol martien est humidifié par une culture nutritive, dont les atomes de carbone sont rendus radioactifs. L'échantillon est ensuite incubé pendant une à deux semaines, afin de laisser le temps aux micro-organismes de se nourrir et de se développer. Les gaz au-dessus de l'échantillon sont par la suite expulsés périodiquement par un jet d'hélium vers le GC/MS, pour mesurer la concentration de carbone radioactif. Dans cette expérience, les échantillons stérilisés avant leur introduction dans la chambre de culture (les échantillons témoins) ne présentaient pas d'assimilations ni d'émissions de carbone radioactif, contrairement aux échantillons non stérilisés dont la réaction était très rapide. C'était la seule fois dans les trois types d'expériences que l'échantillon témoin ne réagissait pas. C'est d'ailleurs les résultats de cette dernière expérience qui laissent encore planer des doutes sur une possible activité biologique à la surface de Mars. *(Date de collecte et de la première injection, Viking 1 : Biologie 1 au Sol 8-10, Biologie 2 au Sol 8-29, Biologie 3 au Sol 36-39 et Biologie 4 au Sol 91-230, et pour Viking 2 : Biologie 1 au Sol 8-11, Biologie 2 au Sol 28-34, Biologie 3 au Sol 51-53, Biologie 4 au Sol 145-147 et Biologie 4 au Sol 145-229)* (Voir l'annexe)

Les résultats de *Labeled Release* semblent vouloir indiquer (sous certaines réserves !), qu'il pourrait exister à la surface de Mars une forme d'activité biologique de type extrêmophile,

ou encore qu'il s'agirait tout simplement d'une forme d'activité chimique qui est reliée au caractère très oxydant du sol martien. Les échantillons conservés dans la cale des atterrisseurs pendant plusieurs mois, ne présentèrent plus aucune activité d'assimilation de carbone radioactif, ce qui semble encore une fois vouloir favoriser le caractère chimique très oxydant du sol martien. La faible détection de molécule organique de chlorométhane (CH_3CL : 15 ppm) effectuée par Viking 1 sur l'échantillon récolté au Sol 8 et chauffée à 200 ^oC, et de la détection de dichlorométhane (CH_2CL_2 : 2-40 ppm) effectuée par Viking 2 sur les échantillons récoltés aux Sols 8 et 51, et chauffée à 350 ^oC et 500 ^oC. Pourrait être le résultat d'une contamination de résidus du solvant (composé d'hydrocarbure chloré : HCL et méthanol) embarqué pour nettoyer les sous système des instruments des Vikings. Il est à noter également que ses molécules n'ont pas été détectées lors des expériences de test mené en vol durant le long trajet vers Mars[3].

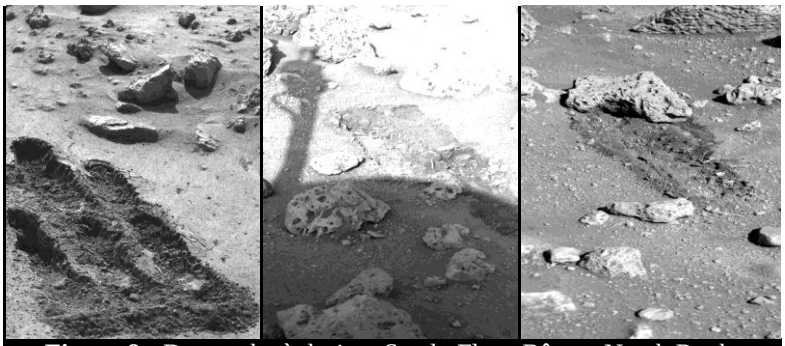


Figure 8 : De gauche à droite : Sandy Flats, Bêta et Notch Rock (Crédit : NASA/Viking 1-2 Lander)

La collecte d'échantillons de sol pour ses expériences de microbiologie a eu lieu sur le site « Sandy Flats » aux Sols 8, 36 et 91 pour Viking 1 (Figure 8). L'échantillon récolté à « Sandy Flats » au Sol 91 a été divisé en trois portions qui ont été stockées durant des périodes différentes (19-69 et 139 Sols) avant leur utilisation. Et les échantillons de Viking 2 ont été récolté sur le site « Bêta » (Deep Hole) aux Sols 8, 28 et 145 (un bris matériel a empêché les mesures pour la dernière expérience de *Pyrolytic Release*), et sur le site « Notch Rock » au Sol 51[4]. L'échantillon récolté sous la roche « Notch Rock » était à l'abri des rayons ultraviolets depuis l'époque où elle s'est déposée à cet endroit, c'est-à-dire depuis qu'elle a été éjectée lors de l'impact d'une météorite avec la surface de Mars. La première injection de substance nutritive marquée au ^{14}C pour les quatre cycles de l'expérience *Labeled Release* de Viking 1, ont eu lieu aux Sols 10, 29 (contrôle), 39 et 232, et la deuxième injection aux Sols 17, 35, 55 et 230. Le cycle numéro trois a eu droit à une troisième injection au Sol 80. Pour Viking 2, la première injection pour les cinq cycles a eu lieu aux Sols 11, 34 (contrôle), 53, 147 (contrôle) et 229, et la deuxième aux Sols 18, 38, 60, et 161. Le dernier cycle n'a eu qu'une seule injection et il s'est terminé au Sol 260. Les cycles 1 de Viking 1 et 2, ont présenté la plus forte activité qui a persisté pendant deux semaines avant de revenir à un taux de radioactivité normal.

Contre toute attente les trois expériences de microbiologie des Vikings ont fournis des résultats très ambigus, et leurs conclusions sont encore très controversées et fortement discutables

[3] Reanalysis of the Viking results suggests perchlorate and organics at midlatitudes on Mars, Rafael Navarro-Gonzâlez et al. Déc 2010.
[4] Géosciences Node of NASA's Planetary Data System.

encore de nos jours. La validité réelle sur la sensibilité et la précision des instruments de mesure utilisée (PNAS[5]), par rapport à l'interprétation des données qu'elles ont fournies (spectromètre de masse et chromatographe en phase gazeuse, qui étaient très réduits en dimension et en précision à cette époque), est de plus en plus contestée et remise en cause. Le débat reste donc ouvert ! La forte teneur d'oxyde de fer (Fe_2O_3) et la présence d'oxydants très corrosifs dans le sol martien, soumis aux UV solaires et à de fortes doses de rayonnement cosmique, pourraient très bien expliquer à eux seuls la plupart des données qui ont été recueillies par les Vikings. La matière organique se trouvant à faible profondeur dans le sol martien, serait de toute évidence détruite par les fortes doses de rayonnement UV solaire. Les expériences de microbiologie des Vikings auraient tout simplement mesuré les propriétés chimiques intrinsèques du sol martien, et sa capacité à assimiler le carbone radioactif par des réactions chimiques très vives impliquant des composés très oxydants. Les instruments n'étaient pas assez précis, et les protocoles expérimentaux étaient inadéquats dans ces conditions pour effectuer la recherche de composés organiques pouvant provenir d'organismes vivants de type extrêmophile, possédant un métabolisme de type chimiotrophe (organisme qui utilise leur énergie à partir de composé chimique). Les traces spectrales auraient été de toute façon noyées dans une mer de spectres, qui aurait impliqué toutes sortes de réactif minéral et de radicaux oxydants (peroxyde d'hydrogène H_2O_2, superoxydes O_2^-), capables d'assimiler et d'émettre du carbone et de l'oxygène.

Ces oxydes ont la propriété et la capacité de réagir chimiquement avec l'eau et le carbone qui était contenu dans les trois chambres de culture. L'échantillon pouvait assimiler directement le carbone radioactif contenu dans le CO et le CO_2 de l'expérience *Pyrolytic Release*, ou dans la matière organique de la substance nutritive de l'expérience *Labeled Release*. Le carbone radioactif prenait tout simplement la place du carbone non radioactif qui était déjà contenu dans l'échantillon par transfert de groupement moléculaire, où encore le carbone pouvait se loger à travers les interstices disponibles entre les minéraux de surface. Il reste à expliquer la non-détection de carbone radioactif dans les échantillons témoins de l'expérience *Labeled Release*, qui peut s'expliquer (avec réserve !) par l'apport d'énergie lors du chauffage. L'apport d'énergie thermique aurait agi comme une sorte de mécanisme de stabilisation sur les liens chimiques des minéraux situés à la surface des échantillons, par l'évacuation des groupements chimiques terminaux plus fragiles constitués de radicaux hydratés. Ce mécanisme de renforcement thermique aurait empêché par la suite l'assimilation du carbone radioactif injecté dans la chambre de culture. Ce type de lien hydraté caractérise les propriétés chimiques très adhésives de la poussière martienne (régolithe), qui forme alors une mince pellicule autour des grains de poussière tout en les maintenant en équilibre avec l'atmosphère par des échanges de radicaux libres produits par le rayonnement ultraviolet solaire. L'émission rapide d'oxygène, qui a été observée dans le mode humide de l'expérience *Gas Exchange*, peut s'expliquer par une réaction vive entre l'eau et les oxydes, et la réaction lente peut s'expliquer par une concentration plus faible en eau contenue dans la culture nutritive, et la faible quantité de carbone détectée aurait été émise lors des réactions secondaires entre l'eau et les oxydes.

Après un certain temps d'incubation, le carbone radioactif (*Pyrolytic Release, Labeled Release*) et l'oxygène (*Gas Exchange*) auraient été libéré de la surface des minéraux sous forme de gaz et ils auraient rempli la chambre de culture. Les superoxydes (O_2^-) ont les propriétés chimiques recherchées pour expliquer en grande partie les expériences de microbiologie

[5] Proceedings of the National Academy of Sciences, 23-27 October 2006 (PNAS|October 31, 2006|vol. 103|no. 44)

Figure 9 : Methanococcoides burtonii (Crédit : genome.jgi-psf.org)

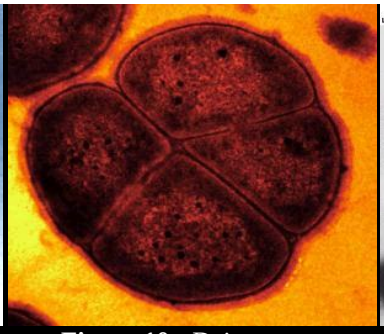


Figure 10 : Deinococcu Radiodurans (Crédit : Michael J. Daly, Ph.D., Uniformed Services University of the Health Sciences)

Figure 11 : Ferroplasma Acidophilum (Crédit : Pivovarova et al)

effectuées par les sondes Vikings (selon plusieurs auteurs, voir plus bas). Ils sont capables de détruire les molécules organiques, ce qui expliquerait la non-assimilation du carbone radioactif, et de dégazer le carbone et l'oxygène en présence d'eau (voir le chapitre « Les Panoramiques de Phoenix » sur la découverte de perchlorate). Ses expériences ont tout simplement permis de démontrer que le sol martien était constitué de minéraux très oxydants, données qui ont été confirmées plus tard par les missions Spirit, Opportunity, Phoenix et Curiosity, et qui ne pouvaient à aucun moment conclure à une trace d'activité biologique quelconque. Les données physico-chimiques et minéralogiques du sol martien n'étaient pas encore très bien connues entre les années 1968 et 1977, et il est bien utile ici de le rappeler. Il reste cependant les données recueillies par la troisième expérience (*Labeled Release*) qui reste toujours troublante, et qui est encore contestée de nos jours. Elle semble vouloir démontrer qu'il pourrait exister sous la surface de Mars, une certaine forme d'activité d'origine biologique qui serait associée à un quelconque organisme extrêmophile. Les extrêmophiles sont capables de survivre dans des environnements aux conditions de vie extrêmes, dont on ne connaissait pas l'existence à l'époque de la conception du programme Viking.

Les premiers organismes de type archées furent découverts en 1970 par Carl Woese, professeur à l'Université de l'Illinois à Urbana, qui faisait alors des recherches sur la phylogénie moléculaire en utilisant l'ARN-ribosomiale 16S. Cette découverte fut une véritable révolution dans le monde de la biologie et de l'exobiologie, en divisant le monde du vivant en trois domaines au lieu de deux. Soit deux domaines à cellules sans noyau : Eubactérie et Archée, et un domaine à cellule avec noyau : les Eucaryotes qui regroupent le monde animal et végétal. Les premiers micro-organismes extrêmes furent découverts dans les geysers d'eau chaude et sulfureuse du parc national de Yellowstone, où des micro-organismes thermophiles se développent à des températures comprises entre 50 °C et 90 °C. Ces sources chaudes se forment à proximité de volcans en activité ou de chambre magmatique de faible profondeur, suite à l'infiltration d'eau de ruissellement dans les fissures et les crevasses des roches qui remonte par la suite en surface chargée de minéraux. Des archées psychrotrophes qui se développent à des températures proches de 0 °C, comme Cryptoendoliths, ont été retrouvées au cœur du continent Antarctique enfouies sous plus de quatre kilomètres de glace (Lac Vostok). Ces conditions de froid extrême rappellent un peu celles qui existent à la surface de Mars, Europe, Titan et Encelade. Il existe des conditions de vie extrêmes qui se trouvent à proximité des oasis des fosses abyssales situées à plus de 2 500 mètres de profondeur, et qui ont été découvertes pour la

première fois sur la crête de la dorsale des Galápagos du Pacifique en 1977, par une équipe de géologues américains qui était à bord du petit sous-marin d'exploration Alvin.

Sous des pressions colossales de plus de 200 bars, soit plus de 200 fois la pression atmosphérique qui est de 1 kg/cm^2 en surface, des archées hyperthermophiles comme Sulfolobus Acidocaldarius vivent et se développent à des températures extrêmes pouvant frôler les 120 °C. Ces archées se développent au contact des fumerolles noires des sources chaudes hydrothermales aux jets d'eau minéralisée sulfureuse et acides à des températures de plus de 350 °C. Ces micro-organismes sont à la base de tout l'écosystème des fonds marins. En Afrique du Sud, on retrouve dans les plus profondes mines aurifères des archées lithotrophes « mangeuse de pierre », qui se développent dans une atmosphère composée de méthane (CH_3) et d'hydrogène moléculaire (H_2). D'autres archées ont également été retrouvées dans des milieux très salés (halophile), comme la mer morte (Haloarcula Marismortui), ou encore dans des milieux très acides (Cyanidium Caldarium). Certaines archées sont capables de résister au vide de l'espace (Bacillus Subtilis), et même de survivre à de fortes doses de radiation à travers les circuits de refroidissement très radioactifs de nos centrales nucléaires (Deinococcu Radiodurans).

Il reste toujours le plat de résistance des micro-organismes extrêmophiles. Il s'agit de la bactérie Deinococcus Radiodurans, un organisme poly extrêmophile qui résiste à presque tous les milieux extrêmes (Figure 10). Cette bactérie est bien connue pour son extrême résistance aux rayonnements ionisants et aux UV, au peroxyde d'hydrogène, au dessèchement et au froid, pouvant résister à des températures extrêmes comprises entre –12 °C et –17 °C. Cette capacité de résistance extraordinaire à différents milieux extrêmes, lui vient de son système de réparation de l'ADN qui est très performant. La bactérie Bacillus Subtilis est capable de vivre dans l'espace, ses spores ont été retrouvées sur un satellite de la NASA après avoir passé plus de 6 ans dans le vide et le froid spatial. L'archée Ferroplasma Acidophilum[6] (Figure 11) est un organisme capable de vivre dans l'acide sulfurique, alors qu'elle ne possède même pas de paroi cellulaire. Ferroplasma Acidophilum est le seul organisme vivant connu à ce jour qui est capable de tirer son énergie de l'oxydation de la pyrite (FeS_2), qui est une roche composée de fer et de soufre que l'on retrouve sur Mars. Neil Reid du Space Telescope Science Institute (STScI) de Baltimore (USA)[7], a émis l'hypothèse pour expliquer les résultats positifs de l'expérience de microbiologie des Vikings, qu'il pourrait s'agir de méthanogènes (qui produit du méthane) du genre Methanosarcina Acetivorans, ou encore d'un organisme halophile du genre Halobacterium Salinarum qui aime les milieux hypersalés avec des concentrations en chlorure de sodium proche de la saturation.

Des organismes vivants dans des milieux extrêmes plus proches des conditions régnant à la surface de Mars sont également proposés. Comme certains organismes psychrotrophes (organismes qui aiment le froid) du genre Methanococcoides Burtonii qui est une archée méthanogène (voir la Figure 9), et Halorubrum lacusprofundi qui est une archée halophile. Ces organismes extrêmes peuvent se développer jusqu'à des températures de –28 °C. L'exobiologiste Dirk Schulze-Makuch (Washington State University, USA) et son collègue Joop Houtkooper

[6] BE Espagne numéro 60 (16/02/2007) - Ambassade de France en Espagne / ADIT
[7] Reid et al. (2006). Terrestrial models for extraTerrestrial life : methanogens and halophiles at Martian temperatures. International Journal of Astrobiology. Vol. 5, n°2, pp. 89-97

(Justus Liebig University, Allemagne)[8] ont émis l'hypothèse, lors du congrès de la société américaine d'astronomie qui s'est tenu à Seattle (État Washington) en janvier 2007, que le liquide biologique qui est contenu à l'intérieur des microbes extrêmophiles pouvant vivre dans le sol martien, baignerait dans une solution organique qui présenterait des concentrations plus fortes en peroxyde d'hydrogène (H_2O_2) ! Ce type d'organisme endolithique qui se nourrit de pierre, serait mieux adapté aux différentes rigueurs que l'on retrouve dans l'environnement martien au climat très sec et glacial. Un tel liquide organique offrirait des avantages aux basses températures, comme celui d'abaisser la température de congélation à -56,5 °C sans former de cristaux qui pourraient causer des lésions fatales aux cellules. Ils suggèrent également que ce type de micro-organisme n'aurait pas pu supporter les conditions offertes par les expériences de microbiologie des Vikings, et qu'ils auraient été détruits par l'ajout de l'eau ou lors de la pyrolyse, sans même avoir eu le temps d'assimiler le CO_2 radioactif (*Pyrolytic Release* et *Labeled Release*). Ils pourraient même être responsables de la libération d'oxygène dans l'expérience de *Gaz Exchange*.

Jeffrey Bada et ses collègues de l'Institut Scripps d'océanographie à La Jolla (Californie), qui a travaillé avec des scientifiques de l'université de Californie à San Diego sur le nouveau détecteur MOD (Mars Organic Detector) utilisé par la sonde Phœnix en 2008. Le détecteur MOD est un instrument qui est beaucoup plus sensible que le GC/MS qui avait été embarqué sur les sondes Vikings. L'équipe de Jeffrey Bada[9], profitant de plus de 30 ans de progrès technologique, estime que les Vikings n'étaient pas assez sensibles pour détecter de faible trace de matière organique. Et qu'un sol contenant plusieurs millions de bactéries par gramme de Terre, serait apparu parfaitement stérile à l'époque pour le GC/MS des Vikings. L'équipe de Rafael Navarro-González[10] et ses collègues (National Autonomous University de Mexico), ont démontré que le spectromètre de masse GC/MS qui était utilisé par les sondes Vikings n'était pas assez sensible pour détecter de faibles traces de matière organique. Testé dans le désert de l'Atacama au Chili et dans le Río Tinto en Espagne, le spectromètre des Vikings n'a détecté aucune trace de molécule biologique, alors que d'autres instruments plus modernes et plus sensibles sont parvenus à détecter de faible taux de matière organique qui était contenu dans des échantillons de sol.

Des scientifiques du Jet Propulsion Laboratory et de l'université de Caltech, dans un article paru dans un numéro de « Science » le 15 septembre 2000, semblent bien avoir identifié les candidats oxydants idéaux. En combinant rayonnement ultraviolet, grains minéraux, oxygène et conditions d'extrême sécheresse dans un tube pour stimuler les conditions qui règnent à la surface de Mars. Ils ont pu observer dans leurs éprouvettes une production d'ions superoxydes à la surface des grains (Albert Yen). Ce n'est pas la première fois que les capacités des sondes Vikings à trouver des traces de vie sur la planète Mars sont remises en cause. Il faudra donc attendre les prochaines missions d'explorations de la surface martienne équipées d'instruments plus modernes et capables de faire des analyses de microbiologie beaucoup plus précises, avant de clore le débat sur une possible vie martienne ! La mission MSL-Curiosity (Mars Science Laboratory) qui a décollé le 26 novembre 2011 et la mission Exomars dont le lancement est prévu en 2028, seront peut-être capables de répondre à cette question.

---

[8] Did We 'Kill' Martian Microbes? New Analysis Of Viking Mission Points To Life On Mars, January 8, 2007.
[9] Earth & Planetary Science Letters, octobre 2006.
[10] Reanalysis of the Viking results suggests perchlorate and organics at midlatitudes on Mars, Rafael Navarro-Gonzâlez et al. Déc 2010.

LES PANORAMIQUES DE VIKING 1 :

Figure 12 : Premier panorama pris par la caméra 2 de Viking 1 (Crédit : NASA/JPL, Viking 1 Lander)

Voici la deuxième image prise par la caméra 2 de Viking 1 (Figure 12). Il s'agit de la toute première vue panoramique qui couvre un angle de 300 degrés sur les plaines volcaniques de « Chryse Planitia », une magnifique mosaïque prise le 20 juillet 1976 sept minutes seulement après l'atterrissage. C'était la toute première fois que l'on pouvait voir un paysage qui provenait directement de la surface de Mars, et ce à quoi cet étrange monde pouvait bien ressembler. À gauche de la photo, on peut voir au Sud sur la ligne d'horizon le flanc nord du Cratère F situé à plus de 100 mètres de distance, et plus loin à droite dépassé le centre de l'image on peut faiblement apercevoir les parois du Cratère A situé à plus de 1,8 km de distance, suivit immédiatement à droite du Cratère B situé à environ 70 mètres de l'atterrisseur. Le ciel est de teinte rouge saumon et le sol est de teinte rouge orangé, causé essentiellement par la suspension et le dépôt d'une petite quantité de fine poussière composée d'oxyde de fer. On peut distinguer des roches sombres et poreuses de type basaltique de forme très variée, qui sont dispersées sur le sol tout autour de l'atterrisseur et dont la taille avoisine les 10 à 20 cm. Certaine roche ont une forme arrondie ce qui semblent indiquer une érosion causée par la présence d'eau dans un passé lointain. Tandis que d'autres ont des formes plus aiguës aux angles très pointus indiquant que ses roches errantes ont été déposées sur le sol martien par des pluies d'éjectas, lors de la chute de météorites et de la formation des différents cratères qui se trouvent à proximité. Un peu plus loin à l'horizon, on peut distinguer des petites dunes ondulantes composées de sable très fin moulé par l'action du vent.

Figure 13 : Première photo couleur (Crédit : NASA/JPL, Viking 1 Lander)

Les sismomètres étaient fixés sur le pont des atterrisseurs (Figure 5), ils ne pouvaient donc pas être déployés directement sur le sol. Ce qui était loin d'être optimal pour la transmission des ondes sismiques du sol vers l'instrument, surtout avec une sensibilité environ 10 fois moins bonne que celles des sismomètres déposés sur la lune au cours des missions Apollo. De tous les instruments embarqués à bord de Viking 1, seul le sismomètre restera inopérant durant toute la mission. La cause est l'échec de toutes les tentatives de commande de déverrouillage envoyée pour débloquer le verrou qui protège mécaniquement la partie mobile des vibrations, de façon à éviter tout dommage ou incident durant le vol interplanétaire. Tandis que le système de déverrouillage

Figure 14 : Premier panorama de la caméra 1 de Viking 1 (Crédit : NASA/JPL, Viking 1 Lander)

du sismomètre fonctionna du premier coup pour Viking 2. Le sismomètre de Viking 1 sera le seul instrument qui restera non opérationnel de tout le programme Viking déployé autour et sur Mars. La première photo couleur prise par la caméra 2 arrive au Sol 2 le 21 juillet 1976 (Figure 13), soit tout juste une journée après l'atterrissage. La photo fut prise en trois étapes à l'aide de différents filtres de couleurs. La teinte rouille que l'on retrouve à la surface de la planète était bien celle à laquelle on pouvait bien s'attendre, pour une planète qui est recouverte d'une fine couche de poussière composée essentiellement d'oxyde de fer (hématite), dont les grains sont balayés et transportés aux grès des vents et des saisons martiennes. L'oxyde de fer contenu dans les minéraux du sol martien, indique que le sol de Mars est très fortement oxydé, aride et très sec. Le site d'atterrissage de Viking 1 a été baptisé « Mutch Memorial Station » en janvier 1982 en mémoire de Tim Mutch, chef de l'équipe du système d'imagerie des atterrisseurs Vikings. Les premières images de Viking 1 nous dévoilent un paysage désertique rougeâtre et très étrange.

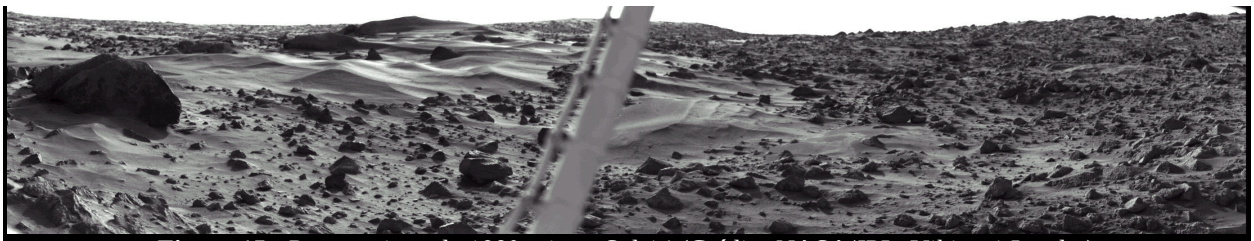


Figure 15 : Panoramique de 100° pris au Sol 14 (Crédit : NASA/JPL, Viking 1 Lander)

La Figure 14 est la première vue panoramique qui a été prise par la caméra 1 de l'atterrisseur au petit matin du Sol 3 (23 juillet). Sur l'image vers le centre, on peut voir le mât qui a servi à prendre des relevés météorologiques et de températures. Les objets visibles sur la ligne d'horizon sont situés à plus de trois kilomètres de distance du module d'atterrissage. La vue pointe dans la direction Est, et le cadre gauche est orienté vers le nord-est tandis que le cadre droit pointe le sud-est. Le module d'atterrissage de Viking 1 s'est posé à moins de huit mètres d'un gros rocher imposant qui a été baptisé « Big Joe » (au centre de l'image). Il s'agit d'un gros rocher d'environ un mètre de haut sur trois mètres de large qui est situé à environ 8 mètres de l'atterrisseur recouvert d'une fine couche de poussière. « Big Joe » présente le même aspect de porosité que les autres cailloux que l'on retrouve tout autour du site d'atterrissage. Au Sol 8 (28 juillet), le bras télescopique a reçu l'ordre de prélever son premier échantillon de sol sur le site baptisé « Sandy Flats » (Figure 8, 17 et 18), dans le but de préparer le premier cycle des expériences de biologique. Une tranchée de 45 cm de long sur 8 cm de large par 4 cm de profondeur est alors creusée pour la première fois dans le sol martien.

Un nouveau cliché panoramique couvrant un angle de 100° (Figure 15) est pris par la caméra 1 de l'atterrisseur au Sol 14 le 3 août 1976 à 7h30 MLT du matin (heure locale de Mars). Ce cliché panoramique met en évidence le gros rocher « Big Joe » et des dunes de sable

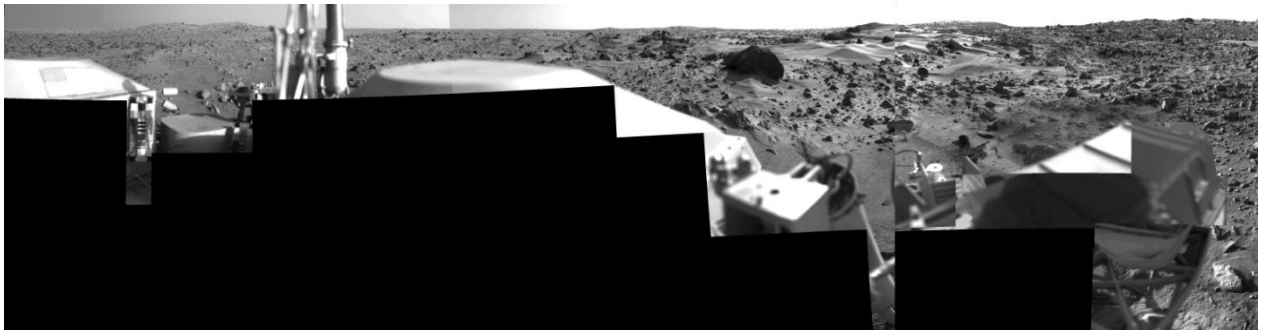


Planche 2 : Panorama de haute résolution de 342° qui a été pris le matin entre 7 et 8 heures sur différents Sols par la caméra 1 au cours de la mission (Crédit : NASA/JPL, Viking 1 Lander)

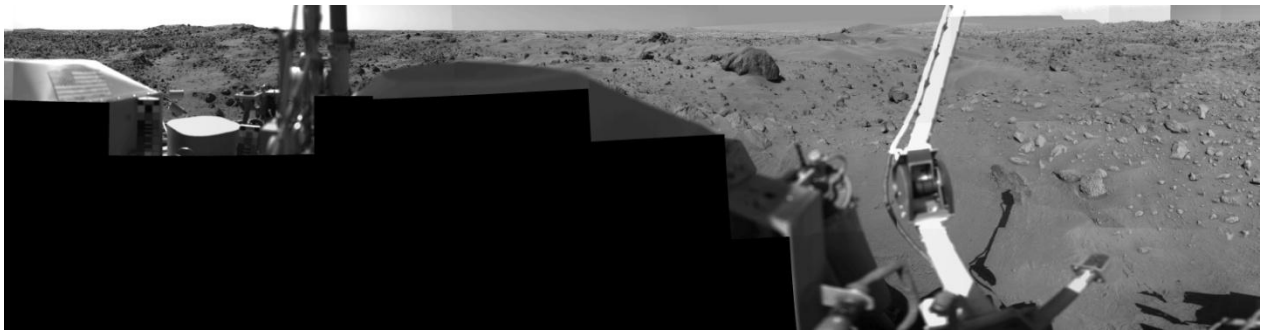


Planche 3 : Panorama de haute résolution de 342° pris l'après-midi sur différents Sols par la caméra 1 au cours de la mission (Crédit : NASA/JPL, Viking 1 Lander)

ondulantes balayées par un vent qui soufflait vers le coin supérieur gauche du cliché, soit vers le nord-est. Les Planches 2 et 3 sont des vues panoramiques composites de haute résolution couvrant un angle de 342,5°. Les images ont été prises sur plusieurs Sols entre 7 heures et 8 heures du matin pour la Planche 2, et dans l'après-midi entre 13 et 14 heures pour la Planche 3. La température moyenne sur « Chryse Planitia » était d'environ de –50 °C avec des vents de quelques mètres par seconde. Contrairement à la Terre, c'est le fer et non l'aluminium qui occupe la troisième position des abondances minéralogiques. Les alumino-silicates (minéraux felsique) terrestres sont remplacés sur Mars par les oxydes de fer et du magnésium (minéraux mafique), comme l'hématite (Fe_2O_3), la magnétite (Fe_3O_4) et la maghémite ($Fe^{3+}{}_2O_3$) qui est un polymorphe de l'hématite.

Figure 16 : Panoramique couleur du Sol 35 (Crédit : NASA/JPL/Olivier de Goursac et E. Vandencbulek)

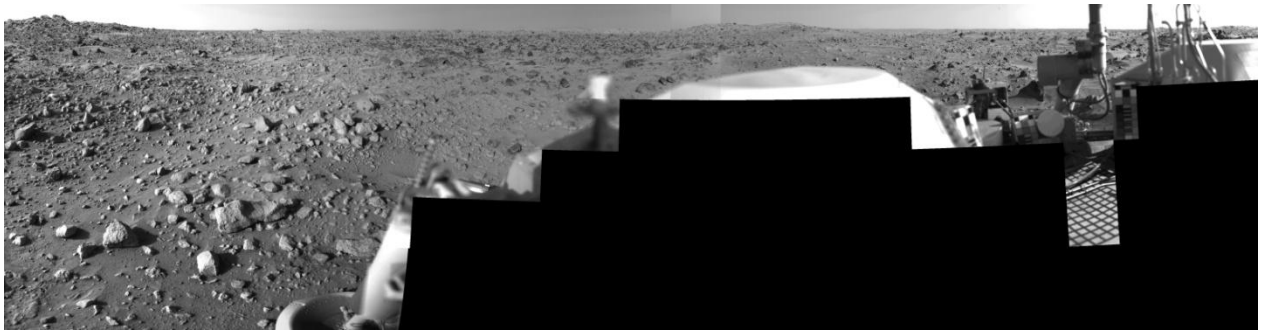


Planche 2 : Suite du panorama de haute résolution pris le matin entre 7 et 8 heures sur différents Sols par la caméra 2 au cours de la mission (Crédit : NASA/JPL, Viking 1 Lander)

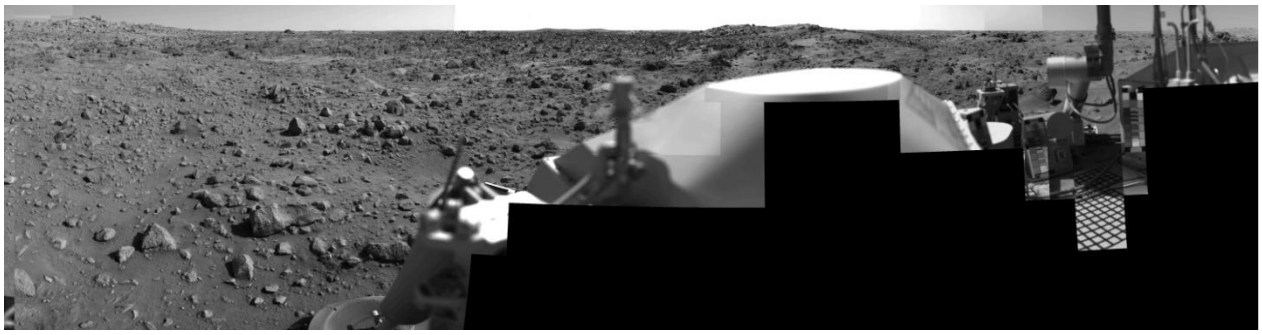


Planche 3 : Suite du panorama de haute résolution pris l'après-midi sur différents Sols par la caméra 2 au cours de la mission (Crédit : NASA/JPL, Viking 1 Lander)

Une photo panoramique de haute résolution prise sur le Sol 35, nous montre le bras télescopique en pleine action sur le sol martien. L'image a été retravaillée plus tard par Olivier de Goursac et E. Vandencbulek en y ajoutant du contraste et de la couleur (Figure 16). Nous pouvons apercevoir sur cette magnifique image couleur, le bras télescopique de Viking 1 qui se prépare à creusé la deuxième tranchée sur le site de « Sandy Flats », qui se trouve au centre de l'image juste en haut de l'ombre portée sur le sol du bras portant les instruments de mesure météorologique. Sur la ligne d'horizon orienté vers le nord, nous pouvons apercevoir la crête nord-ouest du petit cratère B qui se trouve à une centaine de mètres de distance de l'atterrisseur. L'échantillon recueillit sera délivré un peu plus tard (au Sol 36) au mini laboratoire de chimie biologique pour la deuxième expérience de biologie.

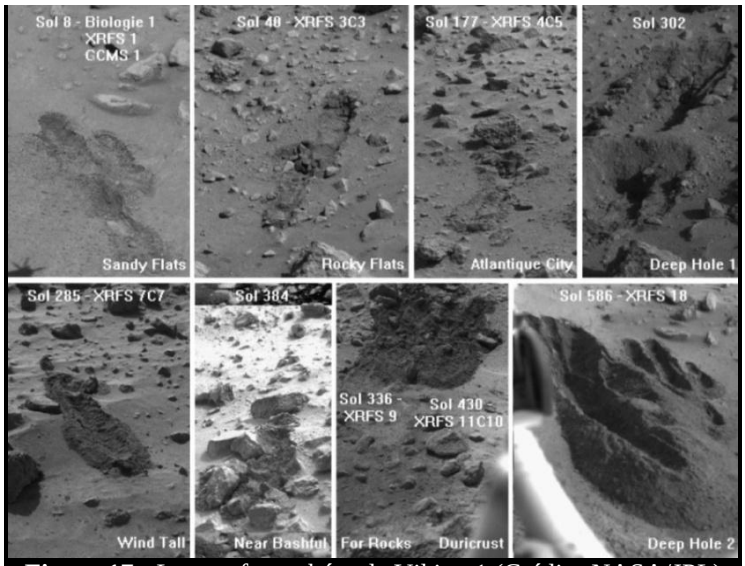


Figure 17 : Les neuf tranchées de Viking 1 (Crédit : NASA/JPL)

Viking 1 creuse sa deuxième tranchée baptisée « Rocky Flats » au Sol 40, puis il effectue dès le lendemain sa première mesure de propriété physique (PP) du sol martien dans la tranchée « Sandy Flats ». La mission primaire se termine avec l'arrivé de la première conjonction solaire

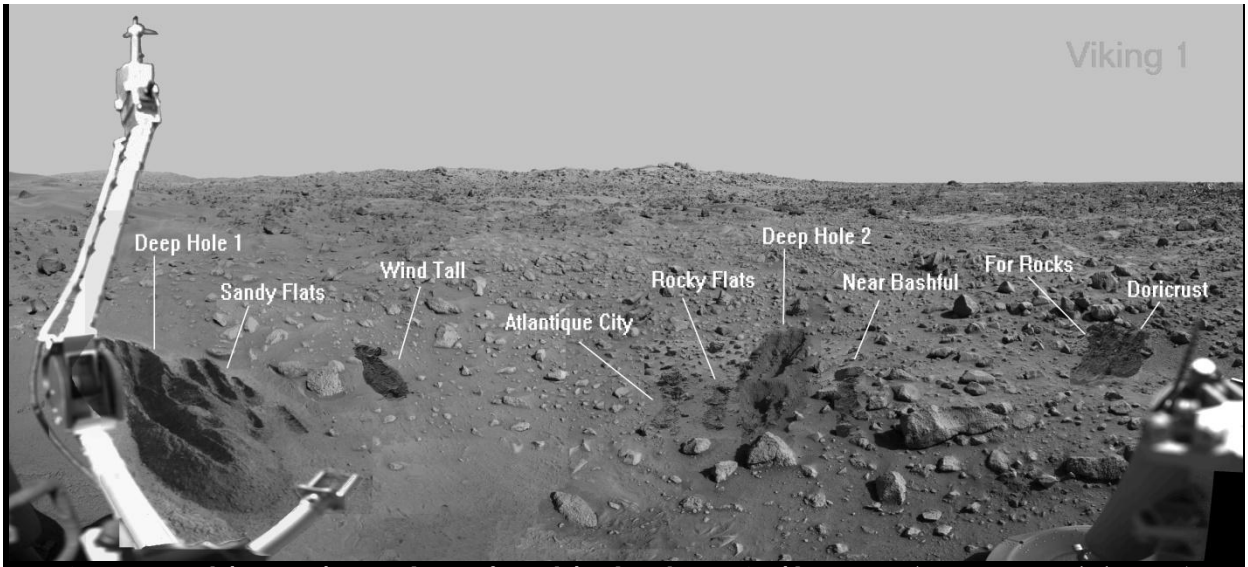


Figure 18 : Schéma représentant les neuf tranchées de Viking 1 (Crédit : NASA/JPL, montage de l'auteur)

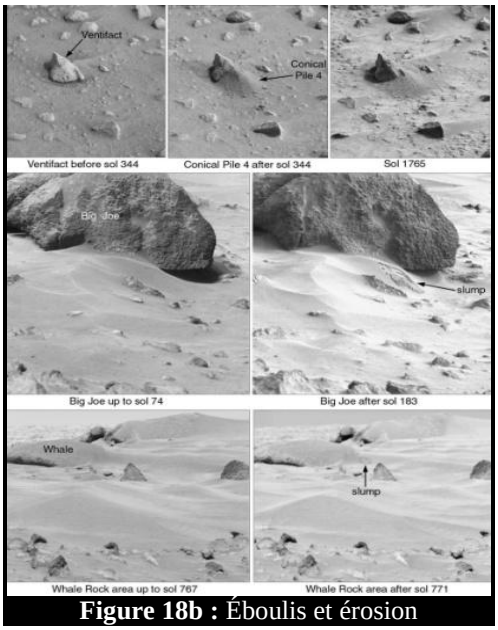


Figure 18b : Éboulis et érosion

le 15 novembre 1976 sur le Sol 116, soit à peine 11 jours avant l'alignement parfait avec le Soleil. L'atterrisseur qui a déjà dépassé sa durée de vie nominale de 90 Sols à la surface de la planète Mars, a droit à une extension d'une durée indéterminée. Un mois plus tard, Viking 1 est de nouveau opérationnel au Sol 146 le 17 décembre 1976, et amorce sa nouvelle mission prolongée en cherchant de nouvelles cibles à analyser sur le sol martien. Une troisième tranchée dénommée « Atlantique City » (Figure 17 et 18) est creusée un mois plus tard sur le Sol 177, dans le but d'effectuer une analyse avec son spectromètre à fluorescence (XRFS). Durant toute la durée de sa mission sur Mars, l'atterrisseur de Viking 1 va creuser et élargir neuf tranchées qui vont servir à tour de rôle soit pour des expériences de biologie, soit pour des analyses chimiques du sol effectuées par les spectromètres GC/MS et XRFS, ou soit pour fair des expériences de propriété mécanique et physique du sol martien. La dernière activité programmée du bras mécanique de l'atterrisseur a eu lieu au Sol 639 près de « Rocky Flats » lors de la onzième mesure de propriété physique du sol martien. Viking 1 fête sa 1ère, 2ièm et 3ièm année martienne au Sol 669, 1337 et 2006 (voir l'annexe pour un résumé des expériences biologiques).

L'atterrisseur de Viking 1 a fonctionné jusqu'au 13 novembre 1982, soit plus de six ans trois mois et 24 jours (2 246 Sols) passés à explorer la surface de la planète Mars, et ayant survécu au passage de trois hivers martien. La perte de Viking 1 fut causée par l'envoi d'une commande erronée qui déplaça le pointage de l'antenne hors du champ de visé terrestre, ce qui provoqua la perte définitive de contact avec le module d'atterrissage. L'orbiteur de Viking 1 était déjà hors d'état de fonctionner depuis le 17 août 1980 après avoir effectué plus de 1 400 orbites, et après avoir épuisé le gaz de son système de contrôle d'altitude, mais il a cependant transmis vers la terre plus de 30 000 images de la surface de la planète Mars.

LES PANORAMIQUES DE VIKING 2 :

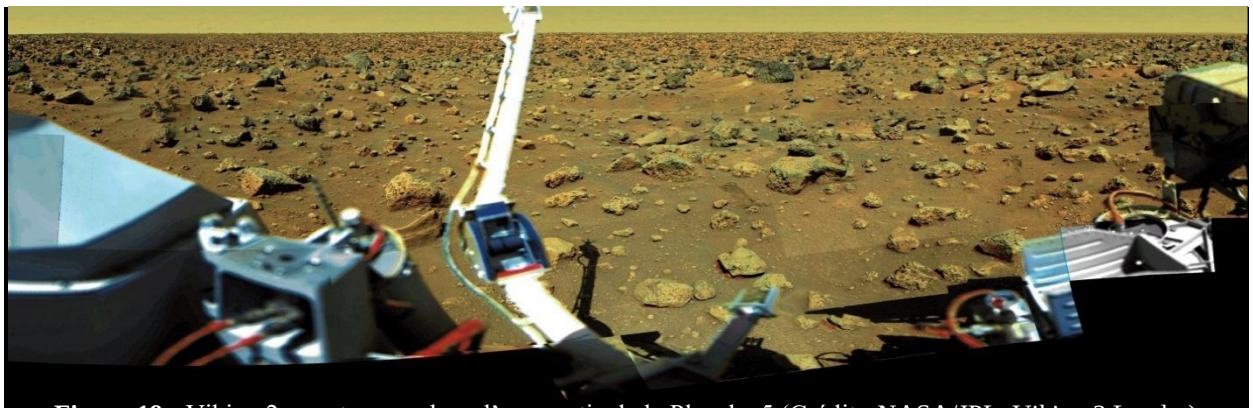


Figure 19 : Viking 2, montage couleur d'une partie de la Planche 5 (Crédit : NASA/JPL, Viking 2 Lander)

La sonde Viking 2 s'est placée en orbite autour de la planète Mars le 7 août 1976, soit 49 jours après les manœuvres d'insertion orbitale de Viking 1. Un mois plus tard, elle reçoit la certification sur un site d'atterrissage et amorce sa descente vers Mars pour se poser en douceur à la surface de la planète le 3 septembre 1976 à 9h50 MLT, heure locale de Mars (22h38 UTC). Le site d'atterrissage de Viking 2 est situé dans « Utopia Planitia » à plus de 6 725 km de distance du site d'atterrissage de Viking 1, et à 170 kilomètres à l'ouest du grand cratère d'impact « Mie » de 93 km de diamètre (Planche 4). Le site d'atterrissage de Viking 2, qui a été baptisé en 2011 « Soffen Memorial Station » en souvenir du responsable scientifique du projet Viking qui est décédé dans un accident de montagne, est localisé à 47,97° de latitude Nord par 134,29° de longitude Est. Le module d'atterrissage de Viking 2 a été le cinquième engin spatial construit par l'homme à toucher le sol martien, et le deuxième après Viking 1 à être en état de fonctionner correctement et en mesure de mener à bien sa mission après son atterrissage.

Figure 20 : Premier panorama de Viking 2 (Crédit : NASA/JPL, Viking 2 Lander)

La première vue panoramique a été prise par la caméra 2 de l'atterrisseur (Figure 20), peu de temps après son atterrissage le 3 septembre 1976 à 15h58 MLT (heure locale de mars), et elle couvre un angle de 330° pointant dans la direction du nord-est. Les roches de couleur sombre sont distribuées de manière uniforme sur le sol et elles ressemblent à des fragments de lave volcanique poreuse, tandis que d'autres aux angles moins prononcés peuvent avoir été érodées par le vent et la poussière composée de sable aux grains fins de 1 à 10 microns. Sur cette image, aucune dune de sable n'est visible à l'horizon, contrairement au site d'atterrissage de Viking 1 dans « Chryse Planitia ». Une partie des roches aux angles plus pointus sont probablement le résultat de pluies de débris d'éjectas lors de la création du cratère « Mie ».

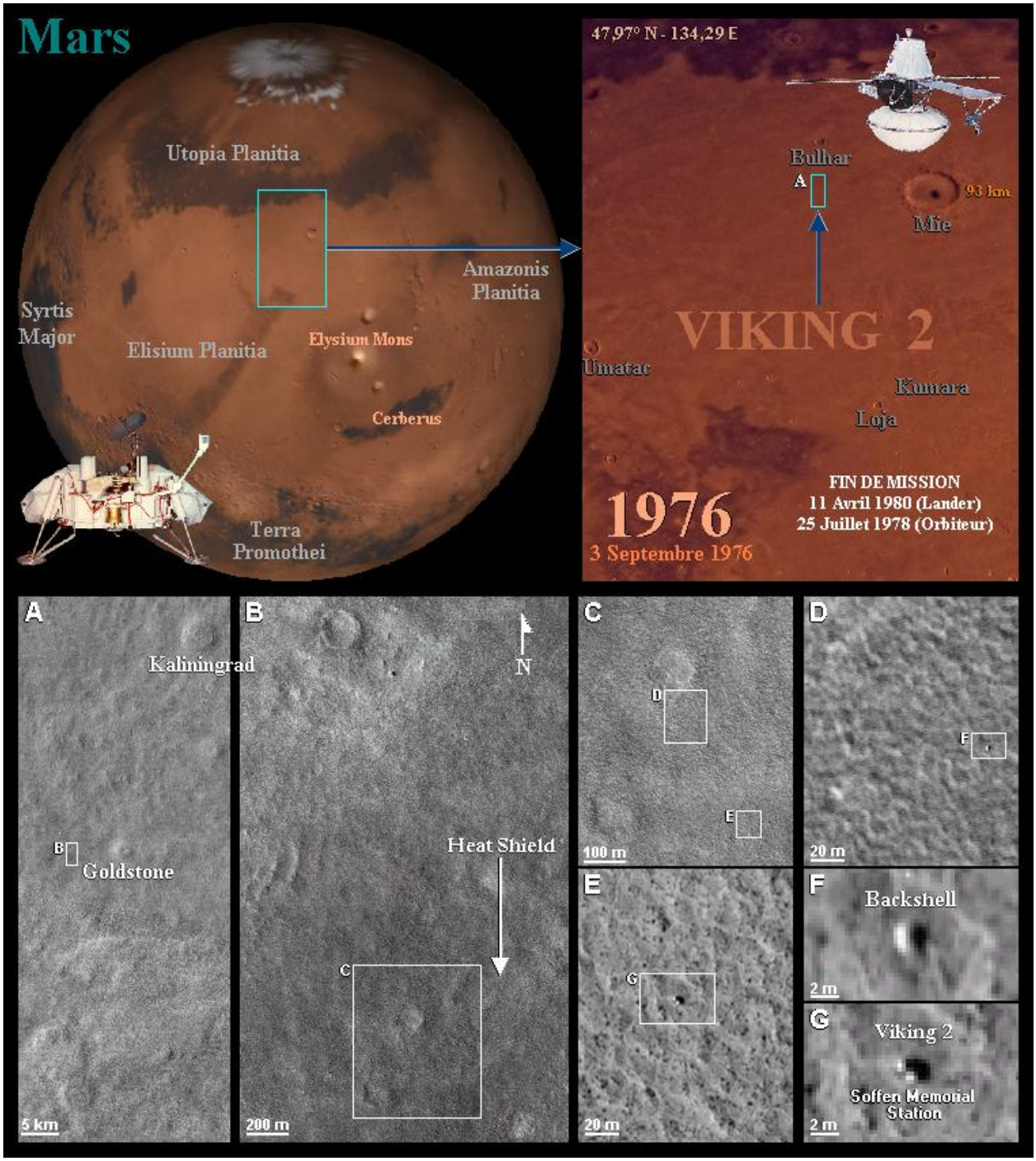


Planche 4 : Le site d'atterrissage de Viking 2 obtenu grâce aux données fournies par la caméra MOC (Mars Orbiter Camera) de la sonde Mars Globale Surveyor (MGS) en mai 2005, et de la caméra Hirise de la sonde Mars Reconnaissance Orbiter (MRO) en novembre 2006. Les photos en bas : L'image A est une photo mosaïque des Vikings qui date des années 1976-77. L'image B est une vue grand angle de MOC qui est 25 fois plus précise que l'image A. L'image C provient de la caméra MOC en mode cPROTO, et les images D-E-F-G sont de la caméra Hirise de MRO (2005). Les 2 photos du haut de cette maquette proviennent des orbiteurs Vikings.

La deuxième vue panoramique en provenance d'« Utopia Planitia » (Figure 21), a été prise sur le Sol 2 le 5 septembre 1976 par la caméra 1, soit seulement deux jours après l'atterrissage. Le panorama couvre une région de 85° et il a été pris dans l'après-midi martien, le

Figure 21 : Deuxième panoramique de Viking 2 (Crédit : NASA/JPL, Viking 2 Lander)

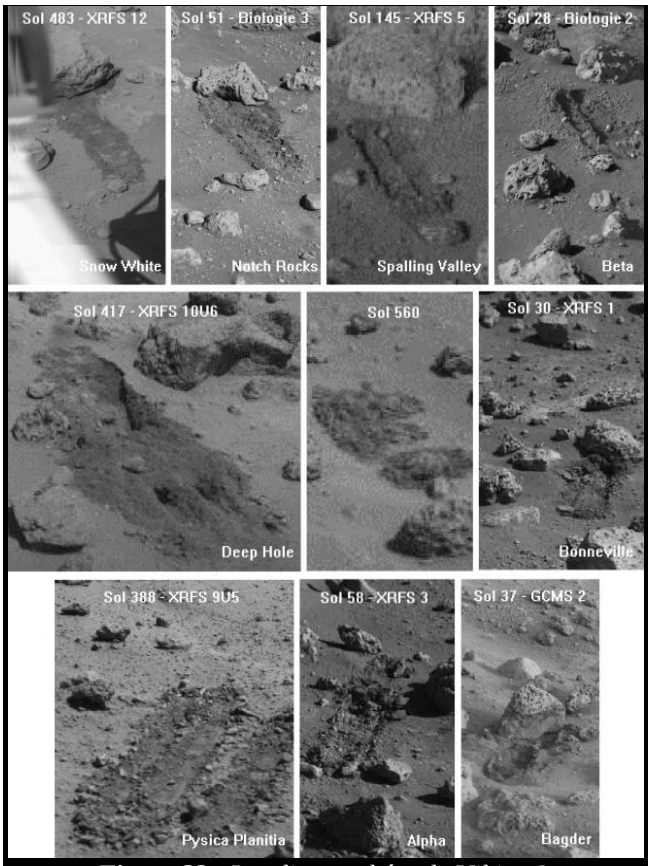


Figure 22 : Les dix tranchées de Viking 2 (Crédit : NASA/JPL)

Soleil qui éclaire les roches sur l'image est situé à l'ouest, et on peut voir les ombres qui sont portées vers la droite sur le cliché (vers l'Est). L'inclinaison apparente de la ligne d'horizon est causée par le pied nº 3 de l'atterrisseur qui s'est posé sur un petit caillou, donnant aux images de Viking 2 une inclinaison de 8,2°. La première image en couleur de Viking 2 a été prise par la caméra 2 le même jour (Figure 24), et elle dévoile une surface qui est remplie de cailloux sensiblement semblables aux images fournies par Viking 1, qui est situé de l'autre côté de la planète. La vue est dirigée vers le nord-est et le Soleil se trouvait derrière la caméra au moment où la photo a été prise. Lorsque les sondes Vikings ont atterri à la surface de Mars en juillet et septembre 1976, c'était le début de la saison estivale dans l'hémisphère nord de la planète. L'été dure environ 178 jours dans l'hémisphère nord et l'hiver à une durée moyenne de 154 jours. La situation est inversée dans l'hémisphère sud de la planète avec des températures qui sont encore plus basses. Les températures sont également plus extrêmes que celle que l'on retrouve sur Terre, allant d'un minimum de plus de –124 °C l'hiver aux pôles à plus de +27 °C l'été à l'équateur, avec des contrastes journalière de température pouvant aller jusqu'à 100 °C entre le jour et la nuit. Les données collectées par le sismomètre de Viking 2, le seul des deux missions qui c'est bien déployé, ne sont pas exploitables. Le sismomètre fixé solidement sur le pont de l'atterrisseur a enregistré tous les mouvements mécaniques qui se produisaient sur ce dernier, comme la rotation de l'antenne grand gain orientable, les déplacements du bras robotique, le fonctionnement du magnétophone et les vibrations de la plateforme sous l'action du vent. La faible sensibilité de l'instrument et le doute porté sur l'origine des mouvements enregistrés, ne permettent pas de faire un traitement réellement utilisable.

La première tranchée dénommée « Beta » de 30 cm de long (Figure 22 et 23) est creusée au Sol 8 (12 septembre), mais au moment de livrer l'échantillonnage contenu dans le godet pour

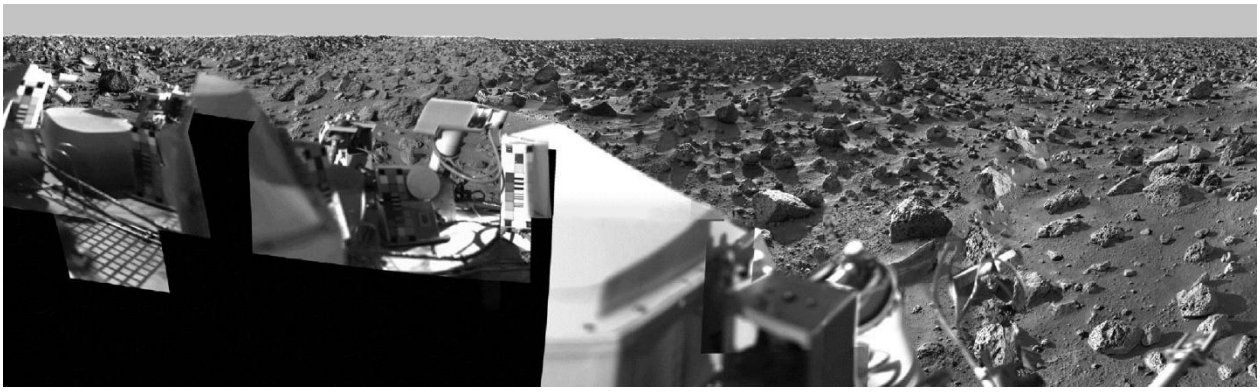


Planche 5 : Viking 2, panorama pris le matin sur différents Sols, caméra 1 (Crédit : NASA/JPL/Viking 2 Lander)

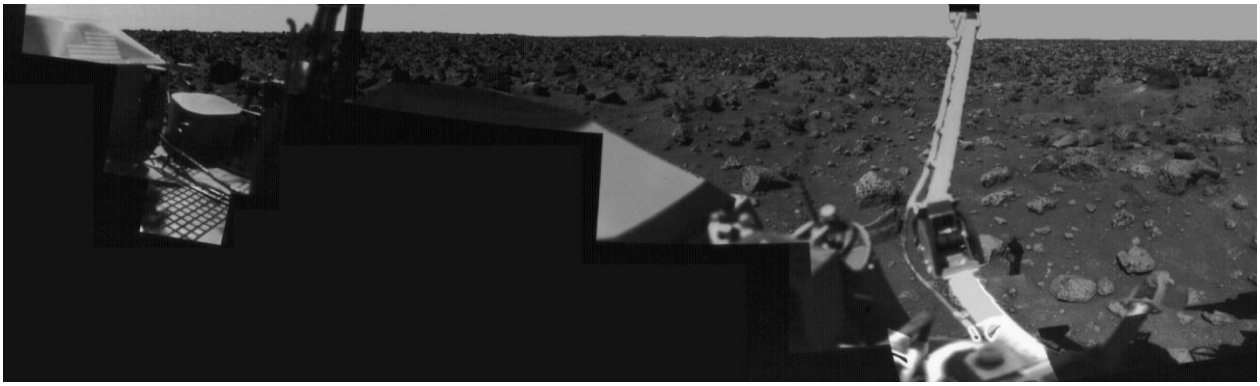


Planche 6 : Panorama pris l'après-midi sur différents Sols, caméra 1 (Crédit : NASA/JPL/Viking 2 Lander)

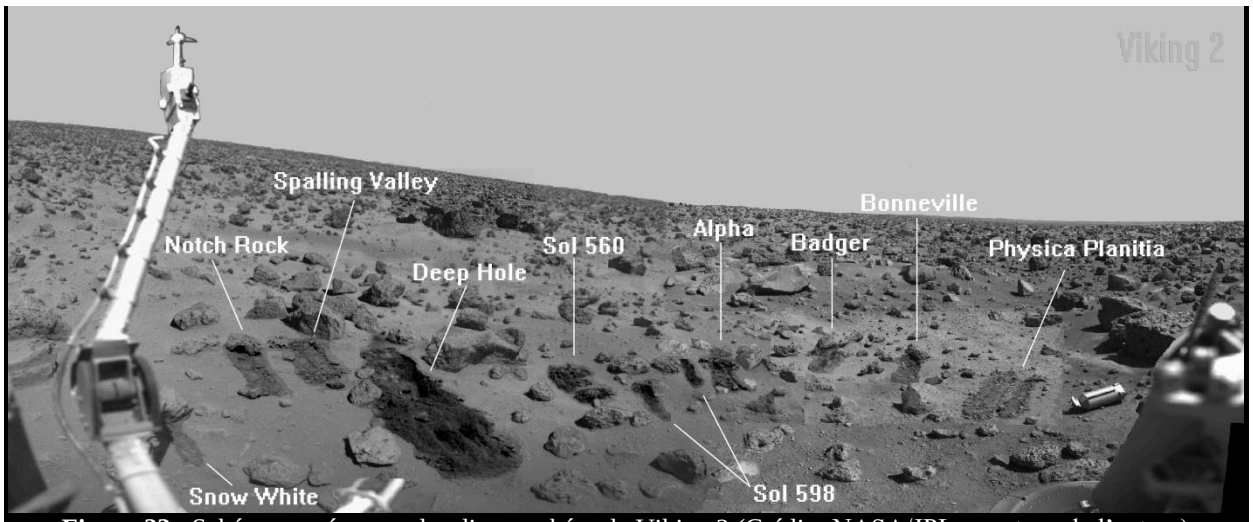


Figure 23 : Schéma représentant les dix tranchées de Viking 2 (Crédit : NASA/JPL, montage de l'auteur)

amorcer la première expérience de biologie, le bras télescopique de Viking 2 tombe en panne et sera de nouveau fonctionnelle que six jours plus tard au Sol 14. La deuxième tranchée baptisée « Bonneville » a été creusée sur le Sol 21 (Figure 22 et 23), où la première expérience d'analyse chimique du sol martien par le spectromètre GCMS a été effectuée. Deux semaines plus tard, le spectromètre GCMS est de nouveau sollicité pour effectuer des analyses dans la nouvelle tranchée baptisée « Badger » creusée le même jour au Sol 34, dont les échantillons prélevée à quelques centimètres de profondeur serviront à la deuxième expérience de biologie (Sol 37). La

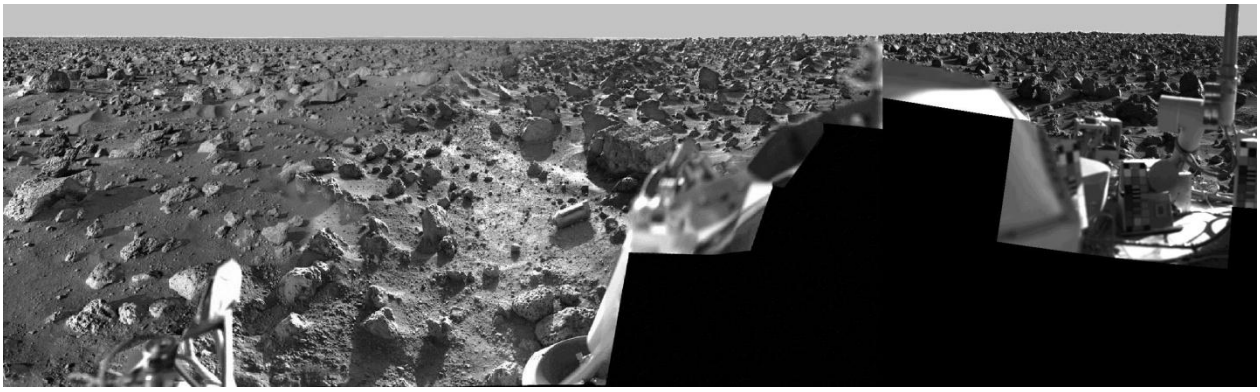


Planche 5 : Suite du site d'atterrissage de Viking 2**,** caméra 2.

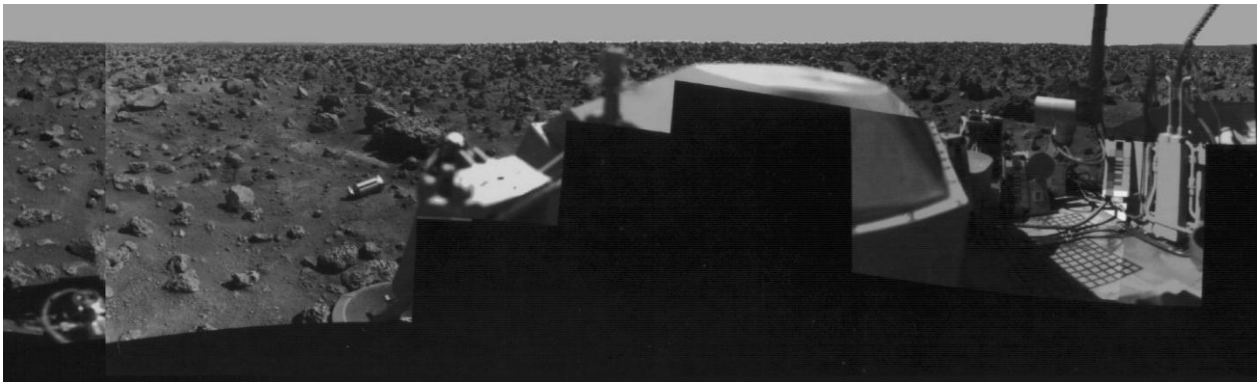


Planche 6 : Suite du site d'atterrissage de Viking 2, caméra 2.

première mesure de la propriété physique (PP) du sol dans « Utopia Planitia » est effectuée au Sol 56 sur les parois de la tranchée « Alpha ». Tout comme pour Viking 1, la mission primaire de Viking 2 se termine avec l'arrivée de la première conjonction solaire du 15 septembre 1976 au Sol 71 de sa mission. Viking Lander 2 a traversé deux conjonctions solaires (fin 1976 et fin 1978), et Viking Lander 1 a traversé trois conjonctions solaires (1976, 1978 et 1981). Un mois plus tard, Viking 2 est de nouveau opérationnel et amorce sa nouvelle mission prolongée sur le Sol 103 (18 décembre 1976). Viking 2 élargit la tranchée « Notch Rock » au Sol 131, qu'il avait creusé initialement au Sol 51 pour la troisième expérience de biologie, afin de pouvoir effectuer la quatrième analyse d'échantillon de sol à l'aide de son spectromètre à fluorescence (XRFS).

Figure 24 : Première image couleur

Figure 25 : Du givre sur le sol
(Crédit : NASA/JPL/Viking 2 Lander)

Viking 2 va subir sa première tempête de poussières au Sol 166 le 20 février 1977, et pour Viking 1 ça sera au Sol 209 de sa mission le 19 février 1977. La première gelée blanche à recouvrir le sol au petit matin arrive le 16 avril 1977 (Sol 219), lors du premier hiver martien à l'approche du solstice d'hiver (30 mai 1977). Le lendemain Viking 2 enregistre une

Figure 26 : Version couleur de la figure 20, qui intègrent des images qui ont été prises au Sol 21 lors de la première expérience GCMS faite à l'ouverture de la tranchée Bonneville, que l'on peut voir vers le centre-bas de l'image. (Crédit : NASA/JPL, Processings : Olivier de Goursac, 2013)

température minimale de -125 °C, et tout comme pour Viking 1, Viking 2 se prépare à passer un long hiver en mode automatique, et reprend ses activités sur la planète Mars que cinq mois plus tard, soit le 26 septembre 1977 au Sol 377.

Les atterrisseurs Vikings ont assisté aux déchaînements de plusieurs tempêtes de poussières durant leur séjour à la surface de la planète Mars au cours des années 1977 et 1982. Dont deux d'entre elles était globale observées par les deux atterrisseurs (1977), et qui ont recouvert de poussière une bonne partie de la surface de la planète avec des vents soufflant à plus de 130 km/h. Viking 1 a survécu à cinq tempêtes de poussière, dont les deux premières étaient de grandeurs globale et les trois autres étaient soit des tempêtes locales ou des Dust Devils (tornade de poussière). La première à été observée au Sol 209 (19 février 1977), la seconde au Sol 313 (6 juin 1977), la troisième au Sol 423 (29 septembre 1977), la quatrième au Sol 1742 (le 14 juin 1981) et la cinquième et dernière au Sol 2209 (7 octobre 1982). Viking 2 a quant à lui survécu à deux tempêtes de poussière globale, soit au Sol 166 (20 février 1977), puis de nouveau au Sol 270 (8 juin 1977). Le 18 mai 1979 au Sol 960 de la mission à 19h47 MLT (heure de Mars), soit un mois après l'arrivée du deuxième solstice d'hiver martien le 17 avril 1979.

La caméra 2 de l'atterrisseur prend la dernière photo couleur de la surface martienne (Figure 25). Celle-ci dévoile alors dans la région sud-est du site d'atterrissage de Viking 2, une fine couche de givre de quelques millimètres d'épaisseur qui recouvre le sol. La dernière activité programmée du bras mécanique de l'atterrisseur a eu lieu sur le Sol 595 près de la tranchée « Bonneville » lors de l'expérience XRFS 17U8. Le bras mécanique sera cependant rétracté de manière définitive au Sol 958 (16 mai 1979), contrairement au bras mécanique de Viking 1 qui sera contracté définitivement une année plus tôt sur le Sol 639 de sa mission le 8 mai 1978. La température minimale observée par Viking 1 a été de -96 °C au Sol 291 (15 mai 1977), et de -124 °C pour Viking 2 au Sol 220 (17 avril 1977). Des rafales de vents supérieurs à 100 km/h ont été

Figure 27 : Panorama créé à partir de plus de 20 images de la plus haute résolution de Viking 2. Quelques trous ont été remplis par des images de résolution plus basse. (Crédit : NASA/JPL, Processings : Calvin J. Hamilton, 1997)

Figure 28 : L'évolution selon les saisons lors de la campagne de Viking 2 sur Mars : L'été (Sol 23), à la fin de l'automne (Sol 245), au cœur de l'hiver (Sol 317) et de nouveau à la fin de l'automne (Sol 1028)
(Crédit : NASA/JPL, Processings : Olivier de Goursac)

mesurées sur les Sols 321 et 423 pour Viking 1, et de 110 km/h au Sol 358 pour Viking 2.

L'orbiteur de Viking 2 fut le premier des modules du programme Viking à tomber en panne le 25 juillet 1978, soit plus de deux années avant l'orbiteur de Viking 1. Après avoir effectué plus de 706 orbites autour de la planète Mars, une fuite a tout simplement épuisé ses réservoirs d'ergol qui servaient au contrôle de l'altitude de son orbite. L'orbiteur de Viking 2 a transmis plus de 20 000 images de la planète Mars au cours de sa mission. Sur la surface martienne, l'atterrisseur de Viking 2 a fonctionné moins longtemps que celui de Viking 1, mais il a tout de même été en service pendant plus de 3 ans 7 mois et 8 jours, soit l'équivalent de 1281 Sols en temps martien. Le lander de Viking 2 sera définitivement désactivé le 11 avril 1980 à cause d'un problème de batterie, dont la détérioration avait débuté sur le Sol 1195 le 14 janvier 1980. Les orbiteurs des sondes Vikings ont transmis 52 603 images au total qui couvraient plus de 90 % de la surface du globe martien, et les atterrisseurs ont transmis plus de 4 587 images de la surface. L'instrument de biologie a effectué un total de 21 cycles d'analyse sur les deux atterrisseurs. Pour plus de détails, voir l'excellent livre de Philip J. Stooke « The International Atlas of Mars Exploration Volume 1, 1953 to 2003 », et celui de Olivier de Goursac « Sur Mars : 50 ans d'explorations martiennes », Delachaux et Niestlé 2026.

Pour aller plus loin:

- Modélisation numérique 3D de l'atterrisseur et des instruments des sondes Vikings de Tom Dahl
  https://www.youtube.com/@TomDahl

LES PANORAMIQUES DE PATHFINDER

La mission Mars Pathfinder fut une très grande réussite et un véritable succès sur tous les points de vue. En plus de démontrer le savoir-faire technologique des ingénieurs de la NASA, elle a permis de relancer l'exploration spatiale de la surface de la planète Mars, qui avait jusqu'alors échouée dans toutes ses nouvelles tentatives pour rejoindre la planète rouge (période de malédiction martienne). Les quatre missions qui ont suivies les sondes Vikings dans l'exploration de la planète Mars avaient échouées. Dans le lot, il y a eu la perte successive des sondes russes Phobos 1 et 2 en septembre 1988 et en mars 1989, qui ont été suivies par la sonde américaine Mars Observer en août 1993 et de la sonde russe Mars 96 en novembre 1996. Depuis la réussite des missions Vikings en 1976, seule la sonde américaine Mars Global Surveyor (MGS) lancée le 7 novembre 1996 avait réussi à remplir avec succès les objectifs de sa mission.

Figure 1 : Lancement
(Crédit : NASA/JPL)

La sonde Mars Pathfinder faisait partie d'un programme plus vaste baptisé Discovery, qui fut créé en 1992 dans le but de trouver une solution aux énormes pertes qui étaient encourues par l'échec de plus des trois quarts des missions qui étaient dirigées vers la planète rouge. Le programme Discovery avait pour principal objectif de faire preuve d'innovations dans le développement de nouvelles technologies pouvant être appliquées dans les futures missions d'explorations interplanétaires. Une technologie plus simple, moins complexe, et surtout moins coûteuse que celle utilisée dans les missions précédentes. Contrairement au programme Viking qui a coûté plus de trois milliard de dollars, la mission Mars Pathfinder n'a coûté que 280 millions de dollars en tout. La mission de Mars Pathfinder était très ambitieuse pour l'époque, elle consistait à faire atterrir en douceur à la surface de la planète un atterrisseur équipé d'un petit robot téléguidé et programmable capable de se déplacer librement sur le sol martien. Mars Pathfinder n'était pas véritablement une mission scientifique, il s'agissait plutôt d'une mission technologique qui a servi de banc d'essai pour le développement de nouvelles technologies plus économiques qui seront mises en œuvre dans les futures missions d'explorations spatiales. Il s'agissait par exemple de tester la résistance de différents matériaux et des circuits électroniques soumis à la dilatation thermique sous des variations quotidiennes de température pouvant frôler les cent degrés, de l'utilisation d'un petit robot autonome et programmable pouvant explorer les environs immédiat du site d'atterrissage, et de l'utilisation de parachute couplé à un système d'airbags géants pour amortir l'impact avec le sol lors de l'atterrissage. La grande réussite de la mission Mars Pathfinder fut accueillie avec un très grand soulagement, et en plus de donner raison au principe d'économie et à l'existence du programme Discovery elle a permis de relancer l'exploration spatiale de la surface martienne.

Pathfinder a été la troisième sonde d'exploration spatiale à se poser en douceur sur le sol de la planète rouge, et qui était toujours capable de remplir avec succès les différents objectifs de sa mission. L'utilisation d'airbags ou de coussins gonflables à la place de rétrofusées dans la phase finale de l'atterrissage, allait désormais garantir un meilleur taux de réussite pour les futures missions d'exploration de la surface de la planète Mars. La mission de Mars Pathfinder a également permis d'innover dans le développement d'un nouveau système de navigation en imagerie 3D, qui était couplé à une interface d'intelligence artificielle intégrée dans le boîtier électronique du petit robot mobile Sojourner (aussi dénommé Rocky). Le nouveau système de navigation permettait d'augmenter la capacité d'autonomie dans la planification et l'exécution de courts déplacements sur le sol martien avec une vitesse moyenne d'environ 1 cm/s. L'astromobile Sojourner alimenté par un petit panneau solaire, était également capable de prendre des décisions simples comme par exemple de contourner de petits obstacles qui se trouvaient juste devant lui et qu'il détectait grâce au balayage d'un ensemble de faisceaux lasers, ou d'attendre au besoin des instructions de navigation en provenance de la Terre. Le rover était également équipé d'une batterie au lithium non rechargeable, qui lui permettait au besoin de faire des opérations nocturnes. Sojourner était un petit robot de 65 cm de long et de 48 cm de large par 30 cm de haut équipé de six roues motrices de 13 centimètres de diamètre montées sur une suspension de type bogie, et les roues pouvaient êtres actionnées de façon indépendante au besoin. L'astromobile était également équipé de deux caméras frontales noir & blanc et d'une caméra couleur située à l'arrière, qui fournira des informations spectrales avec un spectromètre à particules alpha et à rayons X (APXS). Il s'agissait d'une véritable petite merveille technologique à l'époque.

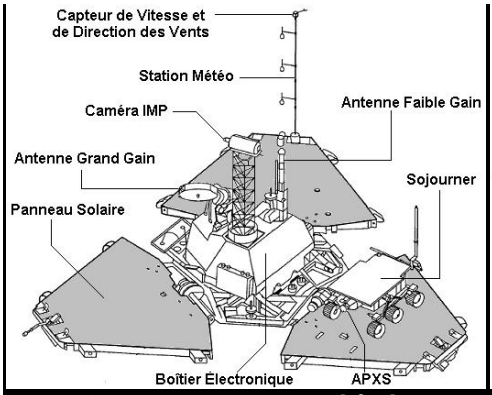


Figure 2 : La Station Pathfinder

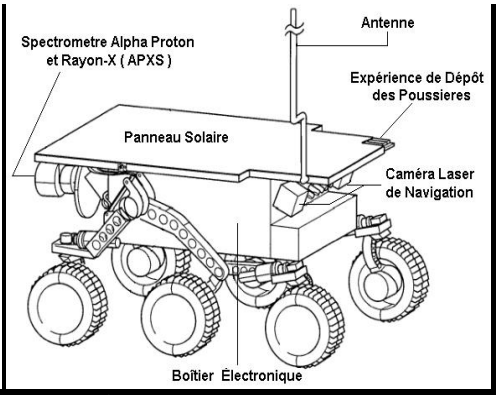


Figure 3 : Le rover Sojourner

(Crédit : NASA/JPL)

Mars Pathfinder fut lancé du Cap Canaveral en Floride le 4 décembre 1996 à 1h58 du matin par une fusée Delta II, soit tout juste un mois après le lancement réussi de l'orbiteur Mars Global Surveyor (MGS) le 7 novembre 1996. Après quelques corrections de trajectoire et un voyage interplanétaire de plus de 497 millions de kilomètres qui a duré 212 jours, soit une croisière de plus de sept mois effectuée à travers le froid intense et le vide de l'espace. La sonde Mars Pathfinder reçoit finalement l'ordre de se séparer définitivement de son module de croisière « Star 48 » le 4 juillet 1997, et d'amorcer sa séquence d'atterrissages sur Mars (Planche 1b). Trente-cinq minutes plus tard, après avoir rebondi plus de 15 fois sur le sol martien sur une distance de plus d'un kilomètre. Le module d'atterrissage de Mars Pathfinder protégée par ses 24 airbags (enveloppe gonflable) regroupées en 4 grappes de 6 ballons servant d'amortisseur, s'immobilisa définitivement à la surface de Mars à 2h56 du matin MLT (heure locale de Mars). La zone d'atterrissage de Mars Pathfinder est située à l'embouchure de deux énormes vallées de

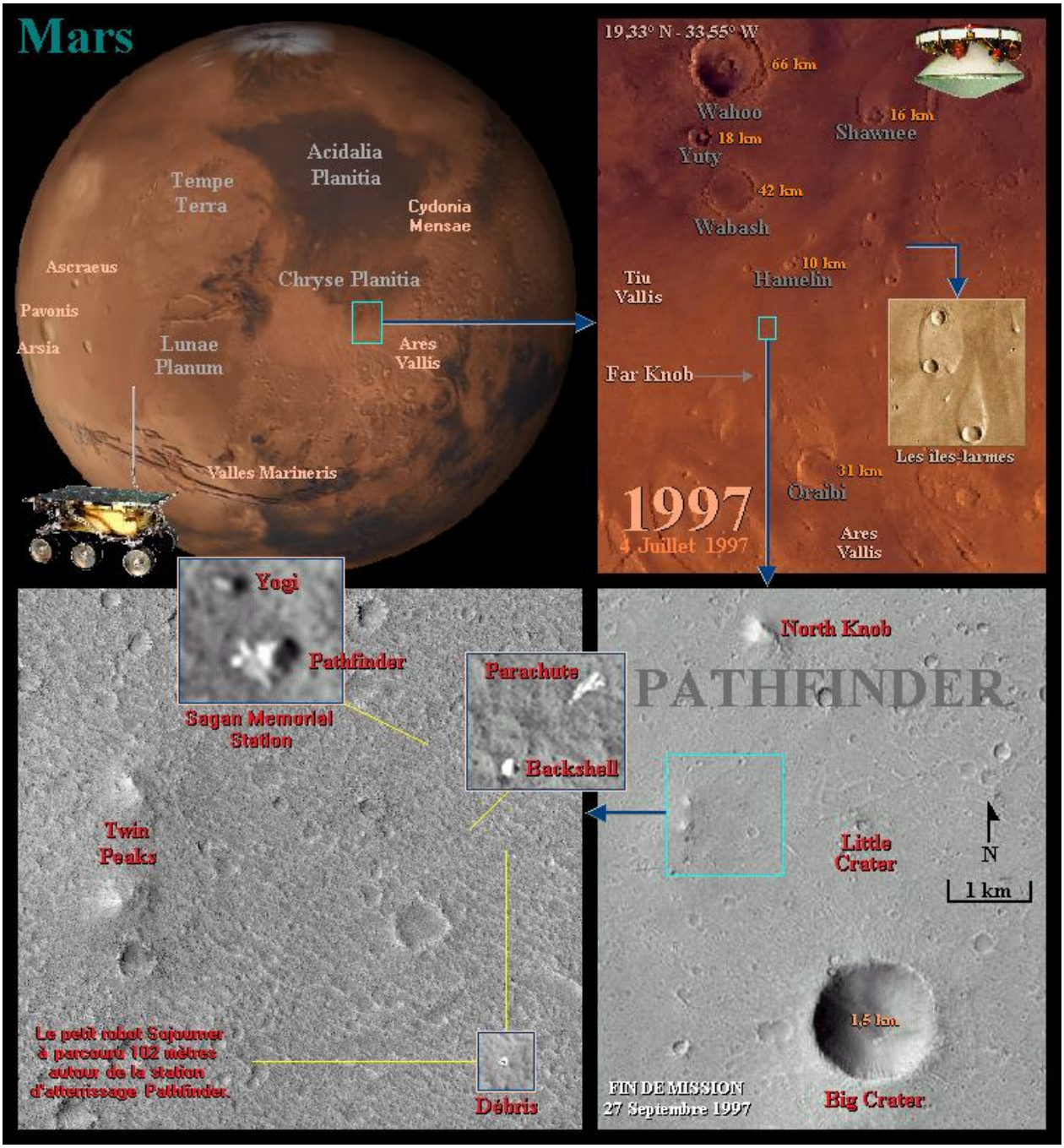


Planche 1 : Le site d'atterrissage de Mars Pathfinder obtenu grâce aux données fournies par la caméra Hirise de Mars Reconnaissance Orbiter (MRO) le 21 décembre 2006 (la série de photos du bas). Les autres photos ayant participé au montage de cette maquette, sont des orbiteurs Vikings des années 1976-77.

débâcles situées dans « Chryse Planitia », soit « Ares Vallis » et « Tiu Vallis » (Planche 1). « Ares Vallis » est une vallée de 1 500 km de long sur plus de 25 km de large par endroit et de 100 mètres de profondeur. Il s'agit d'une ancienne plaine alluviale qui se jette dans la vaste plaine volcanique de « Chryse Planitia », dont l'origine remonte à un passé très lointain. Le site d'atterrissage est situé à 19,33° de latitude Nord par 33,55° de longitude Ouest. Mars Pathfinder s'est posé sur Mars au milieu de l'été dans l'hémisphère Nord de la planète, avec des températures saisonnières variant entre –10 °C le jour à plus de –75 °C la nuit.

Planche 1b : La séquence d'atterrissage de Mars Pathfinder

Les airbags testés et utilisés par Mars Pathfinder sont les mêmes qui seront utilisés plus tard par les rover MER (Mars Exploration Rover) Spirit et Opportunity lors de leur mission en 2004. Les airbags doivent être suffisamment solides pour amortir le vaisseau spatial qui peut rencontrer un terrain accidenté et permettre de rebondir sans difficulté à la surface de Mars. Les airbags doivent être gonflés quelques secondes avant que le module d'atterrissage touche le sol,

et dégonflés aussitôt que le module est stabilisé au sol. Le tissu est un matériau synthétique appelé Vectran qui est presque deux fois plus résistant que d'autres matériaux tels que le Kevlar, et fonctionne mieux à des températures froides. Les airbags sont tous connectés entre eux, ce qui aide à réduire certaines des forces rencontrées lors du choc initial et d'amortir les impacts avec le sol dut aux rebonds lors de l'atterrissage, tout en gardant le système de coussin flexible et réactif à la pression au sol. Le tissu des airbags n'est pas fixé directement ; des cordes qui sillonnent les sacs retiennent le tissu au module. Les cordes donnent la forme aux sacs, ce qui facilite le gonflage. Pendant le vol, les sacs sont rangés avec des générateurs de gaz qui sont utilisés pour le gonflage.

C'était la toute première fois dans l'histoire de l'homme qu'un petit robot mobile allait se déplacer de manière autonome sur le sol martien, et il avait la capacité de transmettre in situ des images et des analyses sur la composition chimique du sol et des roches se trouvant près du site d'atterrissage. L'attente fut longue, mais 87 minutes après l'atterrissage la Station Pathfinder reprenait finalement contact avec la Terre en lui transmettant les premières informations de sa descente, qui arriva au centre de contrôle que 10 minutes et 40 secondes plus tard. La Terre était alors en opposition avec la planète Mars à une distance de plus de 233 millions de kilomètres. La station Pathfinder, qui a été renommée par la suite « Sagan Memorial Station » en l'honneur de Carl Sagan, s'est posée à 835 km à l'est du site d'atterrissage de Viking 1, et à plus de 6 610 km à l'ouest du site d'atterrissage de Viking 2.

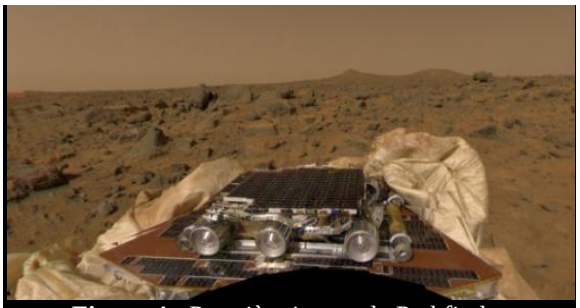


Figure 4 : Première image de Pathfinder (Crédit : NASA/JPL)

La première image nous est transmise le même jour (Figure 4) à 8h30 du matin MLT (heure locale), soit tout juste après le lever du soleil sur Mars. La photo nous montre le petit robot Sojourner qui est toujours attaché sur le panneau solaire, et qui semble être en bon état de fonctionnement. Le décor du site d'atterrissage est teinté de couleur rouille avec deux petites collines qui pointent à l'horizon. Tout comme les images transmises vingt et un ans plus tôt par les sondes Vikings, le sol du site d'atterrissage de Pathfinder est rempli de cailloux de différentes formes et de différentes grosseurs. Il s'agit probablement d'éjectas (roche errantes) qui sont d'origines volcaniques et météoritiques. Une fine poussière de teinte rouge-orangé est en suspension dans l'atmosphère de la planète, qui au gré des vents se dépose un peu partout et forme de petites dunes de sable que l'on peut apercevoir sur le cliché. Cette fine poussière en suspension dans l'atmosphère de Mars est également responsable de la couleur rosée du ciel de la planète. Cette photo est la première d'une série qui va constituer plus tard dans la journée, la première vue panoramique du site d'atterrissage de la station Pathfinder.

Figure 5 : Premier panorama du site d'atterrissage de Pathfinder (Crédit : NASA/JPL)

Figure 6 : La descente de Sojourner

Figure 7 : Barnacle Bill

(Crédit : NASA/JPL)

Vers 16h30 de l'après-midi, les trois pétales de protection de l'atterrisseur sont enfin entièrement déployés, et Pathfinder transmet la première vue panoramique en noir et blanc de 360° du site d'atterrissage (Figure 5). Sur le cliché, on peut voir en arrière-plan du petit robot Sojourner, les deux petites collines jumelles « Twin Peaks » d'une hauteur moyenne de 35 à 40 mètres, et qui sont situées à plus d'un kilomètre au sud-ouest de la station Pathfinder. À gauche de l'image, on peut apercevoir sur la ligne d'horizon la crête nord de « Big Crater » qui se trouve à 2,2 km au sud de la station. Au deuxième jour de la mission sur le Sol 2 (5 juillet 1997), après avoir décoincé les airbags qui bloquent la rampe de descente arrière, le petit robot Sojourner va pouvoir enfin descendre de sa plate-forme d'atterrissage et commencer sa véritable mission d'exploration du sol martien. Le petit astromobile Sojourner a dépassé toutes les attentes de longévité, prévu initialement pour une durée de vie nominale de 7 jours à explorer la surface de Mars. Il a fonctionné en réalité presque douze fois plus longtemps, et il fonctionnait toujours lors de la perte définitive de contact avec la station Pathfinder au Sol 83. Il a parcouru au total plus de 102 mètres en 230 manœuvres tout autour du site d'atterrissage à une vitesse moyenne de 1 cm/sec (Planche 4).

La station d'atterrissage Pathfinder avait également pour tâche de relayer les transmissions radio du robot Sojourner vers la Terre, et de lui transmettre par la suite les commandes et les instructions qui provenaient des ingénieurs de la NASA. Pour ce faire l'atterrisseur disposait d'une antenne grand gain de 30 cm de diamètre ainsi qu'une antenne omnidirectionnel à faible gain. L'atterrisseur possède trois panneaux solaires triangulaires en forme de pétale d'une superficie de 2,8 m^2 pouvant fournir une puissance de 1 200 watts-heure par jour pour assurer l'alimentation électrique de la station, l'énergie pouvait être stockée dans des batteries rechargeable argent-zinc et utilisée pour faire des opérations de nuit. Le module d'atterrissage de Pathfinder était également équipé d'une station météorologique ASI/MET (Atmospheric Structure Instrument/Meteorological Package) servant à mesurer la pression, la température, la vitesse et la direction des vents. Les manœuvres de descentes de Sojourner jusqu'au sol martien ont duré 15 minutes en tout, et elles ont été effectuées à reculons en passant par la rampe d'accès arrière (la rampe de droite sur les images suivante) qui est orientée vers le nord, vu que la rampe de descente avant (situé à gauche sur les images) était trop surélevée et qu'elle présentait un certain risque de dérapage pour le petit robot Sojourner.

C'était la toute première fois dans l'histoire de l'humanité qu'un petit robot roulait et foulait le sol d'une autre planète, et qui avait la possibilité de faire des analyses in situ du sol et des roches. La figure 6 nous montre cet exploit historique et extraordinaire. Il s'agit d'une photo mosaïque composée de huit images qui ont été prises au Sol 2 en fin de journée, et qui ont été

transmises plusieurs semaines plus tard à la Terre. Le spectromètre APXS sera utilisé pour la première fois durant la nuit du Sol 2, sur une cible de sol qui se trouve juste devant la rampe d'accès. Au Sol 3 (6 juillet), l'astromobile Sojourner muni de deux caméras frontales noir & blanc et d'une caméra couleur située à l'arrière, s'approche de la roche « Bernacle Bill » (Figure 7) qui se trouve à 36 cm à sa gauche, et il l'analyse durant plus de dix heures avec son spectromètre APXS (Alpha Proton X-Ray). Le spectromètre APXS est un instrument qui émet des particules alpha (ou noyau d'hélium) et qui analyse parla suite les rayons X qui sont émis par la cible. « Bernacle Bill » est une roche rugueuse d'une vingtaine de centimètres de haut recouverts d'une fine couche de vernis d'altération, et qui présente des similitudes avec les roches terrestres de la famille des andésites. C'est une roche probablement d'origine volcanique composée de basalte, mais qui présente une plus forte teneur en silice (quark) comparable aux roches andésites terrestres.

Sur Terre on retrouve les andésites au niveau des zones de subduction, et ils sont associés à l'activité géologique des plaques tectoniques. Le taux de silice dans les andésites sur Terre est dû à la stagnation suivie par la précipitation des minéraux rocheux mélangés avec l'eau des océans dans les cavités des chambres magmatiques. Avec le temps, les roches s'enrichissent en silice par l'intégration de molécules d'oxygène contenues dans l'eau sous forte pression. Sur Mars, il s'agit peut-être d'un mécanisme de fusion partiel répété avec différentes phases de cristallisation successives (selon certains auteurs), qui aurait été favorisées par la chute d'astéroïdes et de comètes qui étaient beaucoup plus fréquentes dans le passé lointain de la planète. La chute de gros météorite aurait fait fondre la glace d'eau située en profondeur, ce qui aurait provoqué l'hydratation des minéraux contenus dans le sous-sol de la planète pour finalement former les andésites. L'activité volcanique associée au dôme de « Tharsis », au volcan-bouclier « Olympus Mons » et à la vallée « Valles Marineris », a peut-être également participé à ce type de cristallisation fractionnée des andésites sur une longue période de temps, en favorisant par exemple la création de vastes réservoirs d'eau souterraine. Par la suite, une grande quantité d'eau des réservoirs souterrains aurait été libérée lors de l'ouverture de « Valles Marineris », vers la fin de l'Hespérien/Theiikien provoquant ainsi d'énormes inondations, qui auraient drainé les roches de type andésite à travers les différentes vallées de débâcles de la région dont fait partie « Ares Vallis », et qui auraient déposé sur le sol les roches de formes arrondies que l'on retrouve sur le site d'atterrissage de Pathfinder.

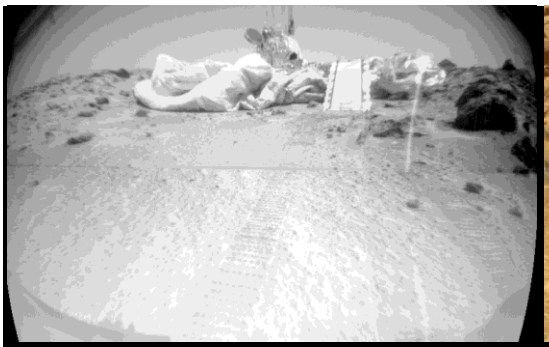


Figure 8 : Sagan Memorial Station

Figure 9 : Yogi

(Crédit : NASA/JPL)

Au Sol 4 le 7 juillet, Sojourner qui était en route vers la roche « Yogi » s'arrête quelques instants pour prendre une magnifique vue de la plate-forme d'atterrissage. On peut voir sur le

Planche 2 : Le Panorama Présidenciel (Crédit : NASA/JPL)

cliché de la figure 8 les airbags dégonflés étendus sur le sol, l'antenne à grand gain, la rampe de descente arrière, et à droite du cliché la roche « Bernacle Bill ». Le 9 juillet sur le Sol 6 à 8h45 du matin, le petit robot Sojourner qui se trouve à environ cinq mètres au nord-ouest de la station Pathfinder, entame pour plusieurs jours l'étude et l'analyse de la roche « Yogi » (Figure 9). « Yogi » est un gros rocher d'un mètre de haut composé essentiellement de basalte d'origine volcanique, il semble plus ancien que la roche « Bernacle Bill » avec une teneur moins élevée en silice. Le premier cliché panoramique en couleur de 360° a été pris entre le 11 et le 13 juillet sur les Sols 8, 9 et 10 par la caméra stéréoscopique IMP (Imager for Mars Pathfinder) de la plate-forme d'atterrissage, et qui a été transmise à la Terre cinq jours plus tard. Cette vue panoramique qui a été baptisée « Panorama Présidenciel » (voir la Planche 2 et la Planche 3 pour la version améliorée dénommée « Gallery Pan ») est composée d'une mosaïque de 100 images plus petites, qui ont été prises à l'aide de trois filtres de couleurs différents (rouge, vert et bleu). Sur cette magnifique image en couleur du site d'atterrissage, on peut voir les trois pétales de Pathfinder déposés sur le sol par-dessus les airbags dégonflés, la partie supérieure du mât métallique de l'antenne à faible gain, les deux rampes de descente au sol (la rampe avant à gauche du cliché étant sur élevée et inutilisable), et le petit robot Sojourner qui se trouve près de l'énorme rocher « Yogi ». Après avoir pris des images d'une cible avec ses caméras frontales de navigation, Sojourner devait reculer et faire demi-tour avant de revenir positionner l'APXS contre la cible pour en faire l'analyse. Ce type de déplacement dessinait sur le sol martien des traces de forme circulaires que l'on peut voir sur les Planches 2, 3 et 4.

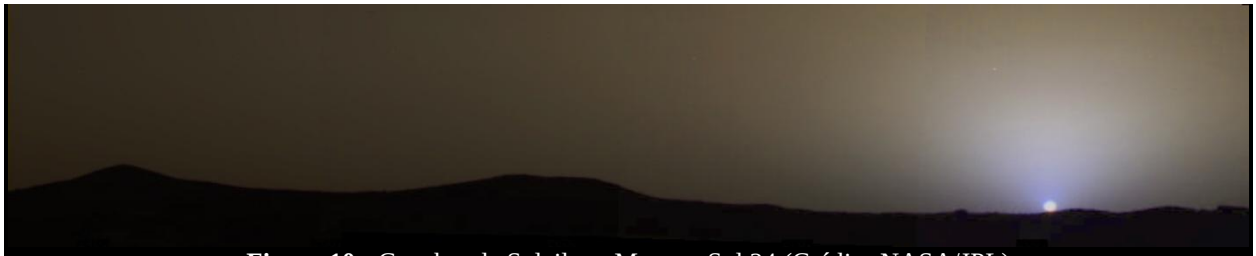


Figure 10 : Coucher de Soleil sur Mars au Sol 24 (Crédit : NASA/JPL)

Les traces de formes circulaires que l'on retrouve devant la roche « Bernacle Bill » et un peu plus loin devant la petite roche « Souffle », faisaient également parties d'expériences sur les propriétés mécaniques et physiques du sol martien. Pour ce faire, le petit robot Sojourner bloquait cinq de ses six roues motrices, et il faisait ensuite tourner la sixième dans tous les sens de façon à

Planche 2 : Suite du Panorama Présidenciel (Crédit : NASA/JPL)

remuer et à faire retourner le sol pour dégager des traces plus claires et bien visibles sur quelques centimètres de profondeur. L'analyse spectrale de ses échantillons de sol a dévoilé une composition chimique qui est semblable à celle de la roche « Scooby Doo », qui sera analysée un peu plus tard au cours de la mission sur le Sol 14, et dont la composition chimique s'est révélée être un peu différente de celle des autres roches d'origines volcaniques rencontrées jusqu'ici. La plate-forme d'atterrissage Pathfinder a également rencontré de petits problèmes de communication qui se sont manifestés à plusieurs reprises au cours de la mission : soit le 5, 10, 11 et 14 juillet. Les ingénieurs de la NASA se sont aperçus que le problème de communication était causé par l'envoi en boucle d'une commande de sécurité, qui a provoqué de manière répétitive le réamorçage du système informatique de bord, qui était composé d'un ordinateur RAD 6000 de 32 bits avec une mémoire de 128 mégaoctets. Le 19 juillet (Sol 16) à la hauteur de la petite roche « Brick », une nouvelle rupture de communication coupe toute liaison avec la Terre pour une durée de 2 jours, mais tout est revenu à la normale avec la correction à distance des routines du logiciel de bord. Le problème était causé par un conflit d'accès de priorité à des zones mémoires, contrôlé par un mutex (mutual exclusion). Il s'agit d'une procédure informatique située au cœur du système, et qui contrôle l'accès aux ressources partagées et à la synchronisation des différentes tâches.

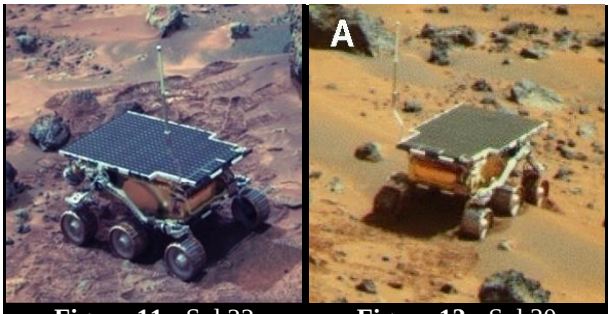


Figure 11 : Sol 22 **Figure 12 :** Sol 30
(Crédit : NASA/JPL)

Le premier test du système de navigation en mode automatique du petit robot Sojourner, appelé la navigation par comportements réactifs (behavior-based navigation), est exécuté trois semaines après l'atterrissage sur le Sol 20 (24 juillet). Le rover reçoit l'ordre de planifier et d'exécuter seul sa trajectoire sur le sol martien à partir d'un itinéraire qui a été programmé d'avance, et qui l'informe sur les grandes étapes de son trajet et de sa destination finale qui se trouve près de la roche « Souffle ». Le système d'imagerie 3D couplé à l'interface d'intelligence artificiel du système de navigation du rover, devra planifier son déplacement et prendre des décisions en utilisant uniquement ses caméras d'évitements d'obstacles de proximité et du détecteur de faisceaux laser (composée de 5 diodes lasers à projection de lignes) qui projetait 5 lignes laser horizontales sur le sol devant lui, afin d'identifier et de contourner les obstacles qui se

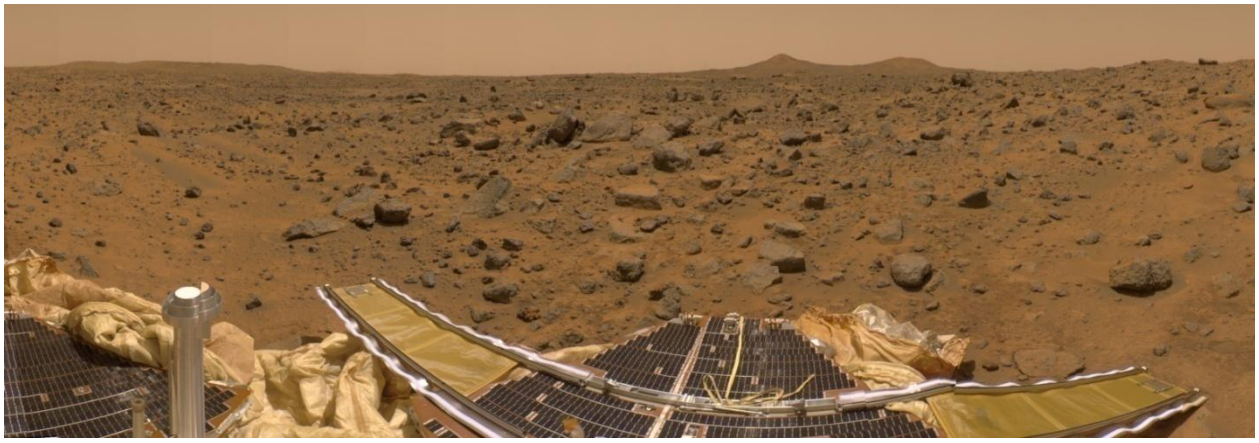


Planche 3 : Panorama Gallery Pan (casserole) (Crédit : NASA/JPL)

trouveront sur son chemin. Les obstacles sont identifiés grâces à des procédures de l'intelligence artificielle, qui en comparant les fichiers numériques du système d'imagerie en relief 3D du terrain construit à partir des images numériques captées par les caméras du système de navigation avec les données reçues par le balayage des faisceaux laser, permettait au rover de faire la planification d'itinéraires sur de courts distances. Le premier test fût une réussite et après avoir parcouru une courte distance de trois mètres vers l'ouest, le rover s'immobilisa à 25 cm devant la roche « Souffle ». Un deuxième test de conduite autonome sur une plus longue distance est effectué deux jours plus tard sur le Sol 22 (Figure 11), puis un autre sur un terrain rocheux au Sol 24.

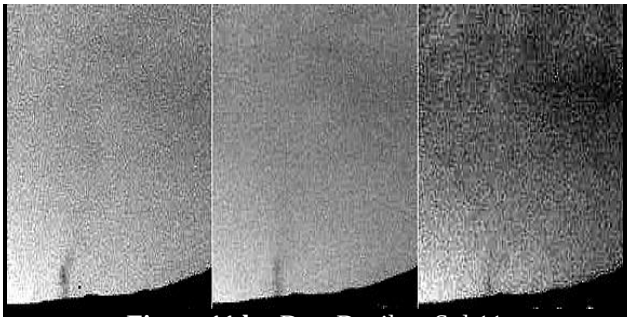


Figure 11 b : Dust Devil au Sol 11
(Journal of Geophysical Research: Planets, Volume: 108, Issue: E12, First published: 11 December 2003)

Le petit robot Sojourner qui contournait la station Pathfinder par le nord-est a établi un nouveau record sur le Sol 24, en parcourant une distance record de sept mètres en une seule journée en plus de prendre une magnifique photo du couché de soleil martien (Figure 10). Le premier tourbillon de poussière (Dust Devil) a été observé au Sol 2 juste avant le déploiement du mât IMP, et c'était la première fois qu'une sonde posée au sol avait l'occasion d'étudier ce type de phénomène météorologique sur la planète Mars. Treize autres tourbillons de poussière ont été observés dans les images retouchées, pour avoir un haut contraste, de la station Mars Pathfinder (IMP) au Sol 10 et 11 (Figure 11:b), fréquemment observés entre 9 heure et 15 heure (heure locale). Les mesures effectuées par la station météorologique ont permis de constater que les grains de poussière poussés par les vents avaient une taille moyenne de quelques microns seulement, et qu'ils possédaient une teneur élevée en soufre. Les capteurs de la station météorologique ont également mesuré des vents qui soufflaient en rafale, avec des pointes de vitesse de 18 km/h en moyenne, suivie par une chute de la pression atmosphérique lors du passage de la tornade de poussières au-dessus de la station.

Les derniers jours du mois de juillet et la première moitié du mois d'août seront utilisés par Sojourner pour contourner la station d'atterrissage par le sud-est, afin de rejoindre la petite

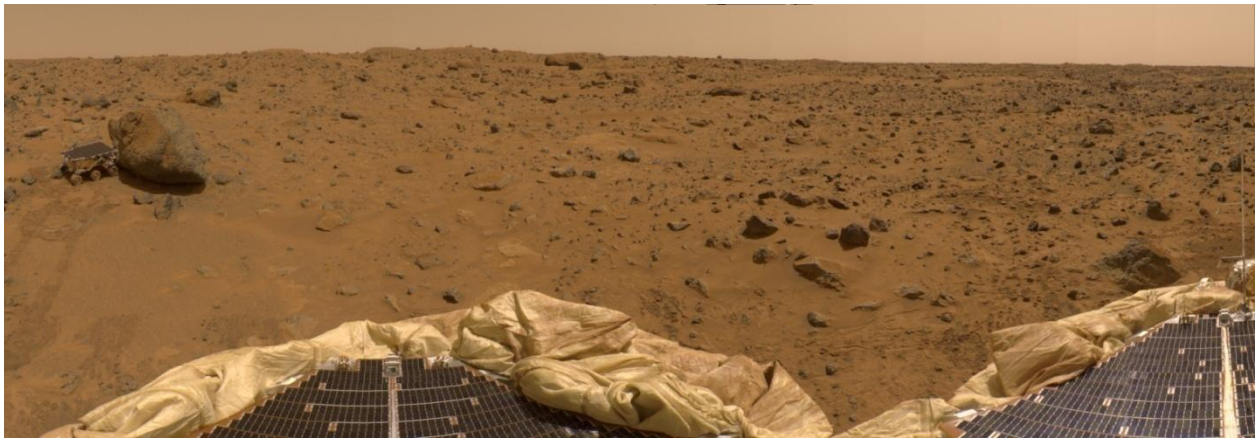


Planche 3 : Suite de Gallery Pan (casserole) (Crédit : NASA/JPL)

dune « Mermaid » au Sol 29 (Figure 12) et la roche « Wedge », qu'il atteindra le 12 août au Sol 39. Après avoir terminé l'étude de la roche « Wedge » sur le Sol 44, l'astromobile Sojourner se dirige vers l'ouest en direction d'une région baptisée « Rock Garden » (le Jardin de rocaille) qui se trouve au sud-ouest de la plate-forme d'atterrissage (Planche 4, partie centrale de l'image de gauche). Les batteries de Sojourner cessent de fonctionner sur le Sol 58 (2 septembre), le rover ne pourra plus faire d'opérations nocturnes avec le spectromètre APXS, qui devra désormais être utilisé uniquement qu'en journée lorsque les cellules voltaïques des panneaux solaires situées sur le dessus du rover fournissent assez d'énergie. Sur la route, le petit robot s'arrêtera à plusieurs reprises pour étudier les roches « Moe » au Sol 64 (Figure 13 et 14), « Stimpy » au Sol 67, « Half Dome » au Sol 71, puis « Shark » et « Chimp » entre les Sols 72 et 74 (du 16 au 18 septembre). Le petit robot Sojourner qui se trouve derrière la roche « Chimp » sur le Sol 74 à environ dix mètres au sud-ouest de la plate-forme d'atterrissage, a atteint la distance qui sera la plus éloignée autour de la station Pathfinder durant toute la mission. Par la suite, le robot Sojourner revient sur ses pas au Sol 78 afin d'aller rejoindre de nouveau la roche « Chimp », où il restera immobile pour l'étudier plus en détail jusqu'au Sol 83. Il s'agit de la dernière position connue du robot Sojourner avant la perte définitive de tout contact avec la station Pathfinder.

Figure 13 : Les Twin Peaks au Sol 64 (Crédit : NASA/JPL)

L'astromobile Sojourner aura effectué 15 expériences de chimie durant sa mission sur Mars. Soit cinq analyses de roches : « Bernacle Bill », « Yogi », « Scooby Doo », « Wedge » et

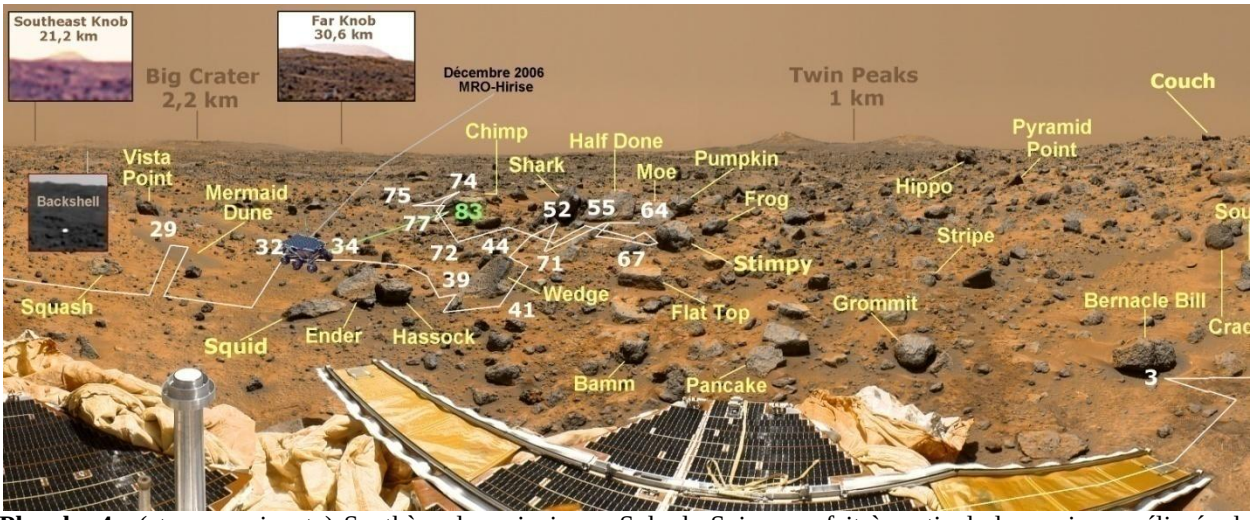


Planche 4 : (et page suivante) Synthèse des principaux Sols de Sojourner fait à partir de la version améliorée de Gallery Pan (casserole).

Figure 14 : Devant la roche Moe
(Crédit : NASA/JPL/University of Arizona)

« Shark », et six analyses d'échantillons de sol martien. Au Sol 83 le 27 septembre 1997 à 10h23 UTC, la station Pathfinder devient subitement silencieuse pour toujours, ayant perdu tout contact radio avec la Terre. La perte de contact semble être causée par une défaillance de la batterie, qui n'aurait pas résisté à l'arrivée des grands froids à l'approche de l'hiver martien avec des températures comprises entre –10 °C le jour à –75 °C la nuit. Il se peut également que la perte de signal fut causée par une trop grande accumulation de fines poussières sur les panneaux solaires de la station. Le rover Sojourner devait attendre 7 jours de silence radio avant d'activer ses procédures d'urgence lors d'une perte de contact avec la Terre. Ce programme de secours donnait l'ordre au robot de retourner par ses propres moyens près de la station d'atterrissage, et de tourner lentement autour d'elle dans l'attente d'un signal, mais ce dernier n'est jamais venu ! À l'occasion du trentième anniversaire des missions Vikings en 2006, la NASA a utilisé la caméra Hirise de hautes définitions de Mars Reconnaissance Orbiter (MRO) pour essayer de retrouver et de photographier les sondes qui se sont posées à la surface de Mars. À partir des images prises par MRO le 21 décembre 2006, qui a photographié pour l'occasion le site d'atterrissage de Mars Pathfinder (Figure 15). On peut remarquer sur certaines images que Sojourner a bel et bien activé son programme de secours, et qu'à partir de sa dernière position connue sur le sol martien le 27 septembre 1997, il semble que le petit robot s'est déplacé de la roche « Chimp » vers la petite dune « Mermaid » (le trajet est indiqué en vert sur la Planche 4). Il est cependant bien difficile de savoir combien de tours le petit robot a réellement effectué autour de la station Pathfinder. L'arrivée de l'hiver martien aura eu finalement raison de lui, l'immobilisant à jamais dans « Ares Vallis ».

La mission qui était prévue initialement pour une durée de vie de 30 jours à la surface de Mars, le module d'atterrissage Pathfinder aura fonctionné presque trois fois plus longtemps que prévu. La mission de Mars Pathfinder aura transmise plus de 16 500 images au total, dont 15 450

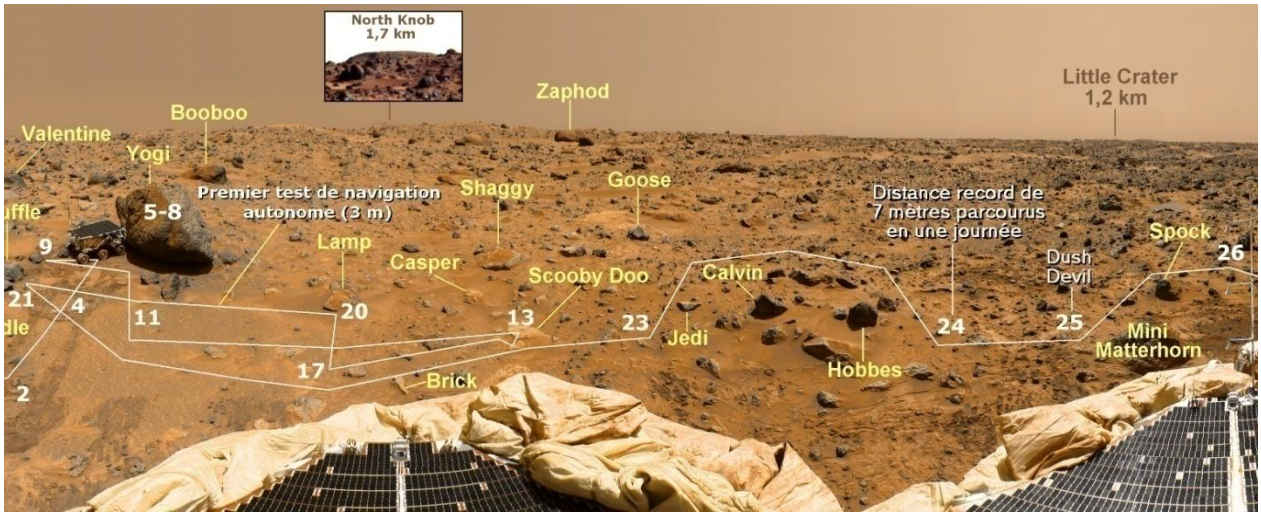


Planche 4 : (Suite de la page précédente) Synthèse des principaux Sols de Sojourner fait à partir de la version améliorée de Gallery Pan (casserole).

images prises par la caméra IMP de Pathfinder et 550 images via le petit robot Sojourner. Les données fournies par la sonde Mars Pathfinder et par les sondes Vikings semblent indiquer que les roches situées à la surface de la planète Mars sont très oxydées, et qu'elles seraient d'origines volcaniques avec une forte teneur en fer, silice et soufre. Les données fournies par les instruments de Mars Pathfinder et de Sojourner, ne sont pas assez précises pour conclure de manière définitive sur l'origine de la composition chimique des roches et du sol martien. La fine couche de poussière rouge qui est composée essentiellement d'hématite et qui recouvre tout à la surface de la planète Mars, à de toute évidence faussée quelque peu les analyses. La planète Mars garde encore ses secrets, mais les futures missions d'explorations de la surface martienne, comme nous allons le voir dans les chapitres suivants, vont nous permettre de mieux comprendre l'évolution de cette planète.

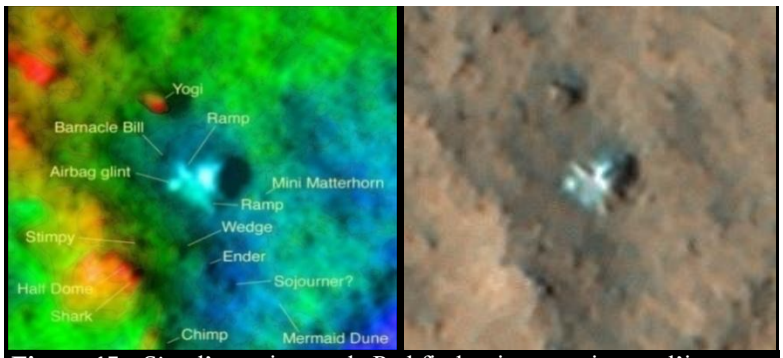


Figure 15 : Site d'atterrissage de Pathfinder, image prise par l'imageur Hirise de Mars Reconnaissance Orbiter le 21 décembre 2006 (Crédit : NASA/JPL/University of Arizona & PDP8E image de droite)

Pour aller plus loin:

- AGU: Results From Mars Pathfinder: 21 September 2012, Last updated: 18 March 2018
https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/toc/10.1002/(ISSN)2169-9100.RESPATH1

LES PANORAMIQUES DE SPIRIT

La mission spatiale américaine Mars Exploration Rover (MER) développé par le centre de recherche spatiale JPL (Jet Propulsion Laboratory) de la NASA était composée de deux robots mobiles identiques, soit les astromobiles (rovers) Spirit (MER-A) et Opportunity (MER-B). Les astromobiles MER étaient capables de se déplacer et de rouler seuls sur de grandes distances à la surface de la planète Mars. L'intelligence artificielle de Spirit et d'Opportunity était beaucoup plus sophistiquée que celle utilisée par le petit robot Sojourner, lors de la mission de Mars Pathfinder en 1997 qui avait alors servi de banc d'essai pour l'intégration de cette nouvelle technologie de navigation autonome sur le sol martien. Les rovers étaient capables de planifier de longs trajets sur le sol martien, et ils étaient aptes à prendre des décisions par eux-mêmes pour identifier et contourner de petits obstacles qui se trouvaient sur leur route. La grande autonomie des rovers leur permettait également de mener à bien des séquences d'analyses planifiées d'avances sur des échantillons de sol et de roche avec différents instruments. La mission principale des rovers était de faire l'étude géologique du sol martien dans le but de trouver des indices minéralogiques sur la présence ancienne et prolongée de l'écoulement de l'eau à la surface de la planète. Cette étape était rendue essentielle avant de pouvoir passer à l'étape suivante dans l'exploration martienne, qui est celle de la recherche d'éventuelles traces de vie sur la planète. Cette prochaine étape sera effectuée par des missions futures, comme pour Mars Science Labotary (MSL) lancée le 26 novembre 2011, de Mars 2020 (Perseverance) lancée le 30 juillet 2020, et du programme Exomars de récupération d'échantillon prévu pour 2028.

Figure 1 : Départ de Spirit (Crédit : NASA)

Les deux astromobiles Spirit et Opportunity étaient équipés comme de véritables petits géologues martiens, et ils transportaient avec eux plusieurs instruments scientifiques de très haute technologie (Figure 2). Les rovers avaient également la possibilité de transmettre leurs données vers la Terre à partir de trois antennes de télécommunications différentes. Les communications radio pouvaient se faire de manière directe avec la Terre, en utilisant la plage de fréquences en bande X (Supra-haute fréquence de 10 gigahertz) dirigé vers le réseau des stations de suivi Deep Space Network (DSN) de la NASA basé en Australie, en Californie et en Espagne. Soit à partir de l'antenne parabolique orientable à gain élevé de 23 cm de diamètre (HGA de 11 Kbit/sec), ou via l'antenne omnidirectionnelle fixe à faible gain (LGA de 7 à 10 Kbit/sec). Ou encore de manière indirecte par l'intermédiaire de relais de transmissions établis entre l'antenne omnidirectionnelle UHF (ultra haute fréquence) de 128 Kbit/sec avec des orbiteurs, qui gravitaient autour de la planète à cette époque. La tête du mât des rovers était équipée de deux caméras de navigation à grand-angle et de faible résolution (NAVCAM), de deux caméras panoramiques stéréoscopiques

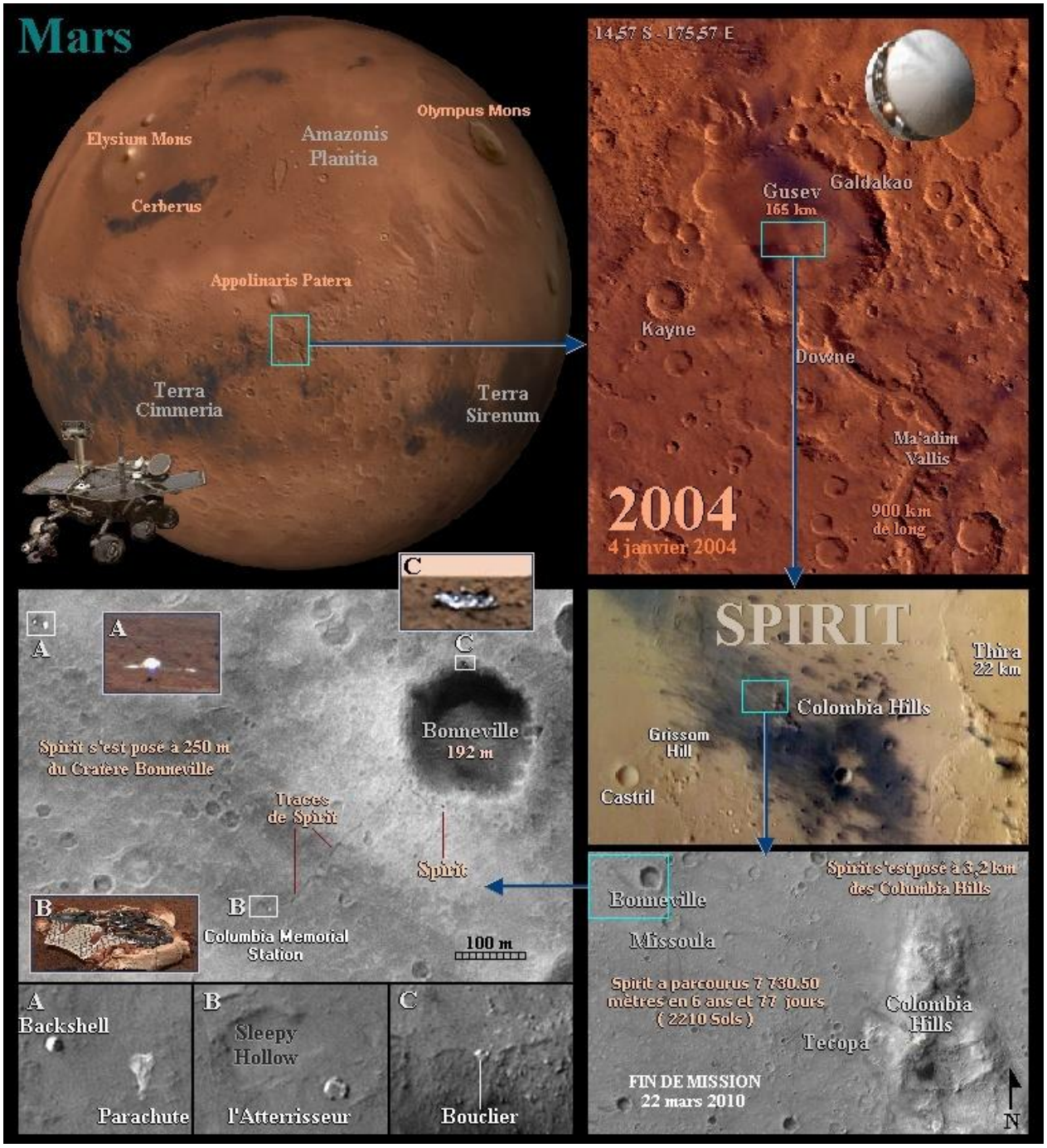


Planche 1 : Le site d'atterrissage de Spirit obtenu grâce aux données fournies par la caméra MOC de Mars Global Surveyor (MGS) le 30 mars 2004 (photo au centre à gauche) et par la caméra Themis de Mars Express en janvier 2004 (photo au centre à droite). Les quatre photos du bas sont de la caméra Hirise de Mars Reconnaissance Orbiter (MRO) prise le 26 novembre (photo en bas à droite) et le 12 décembre 2006. Les 2 photos du haut ayant participé au montage de cette maquette sont des orbiteurs Vikings.

de haute définition (PANCAM) et d'un spectromètre à émission thermique miniature (Mini-TES). Le spectromètre infrarouge Mini-TES était utilisé pour faire l'étude minéralogique d'échantillons de sol et de roches en mesurant le rayonnement naturel infrarouge émis par les objets, en plus de prendre des mesures régulières de l'opacité de l'atmosphère martienne

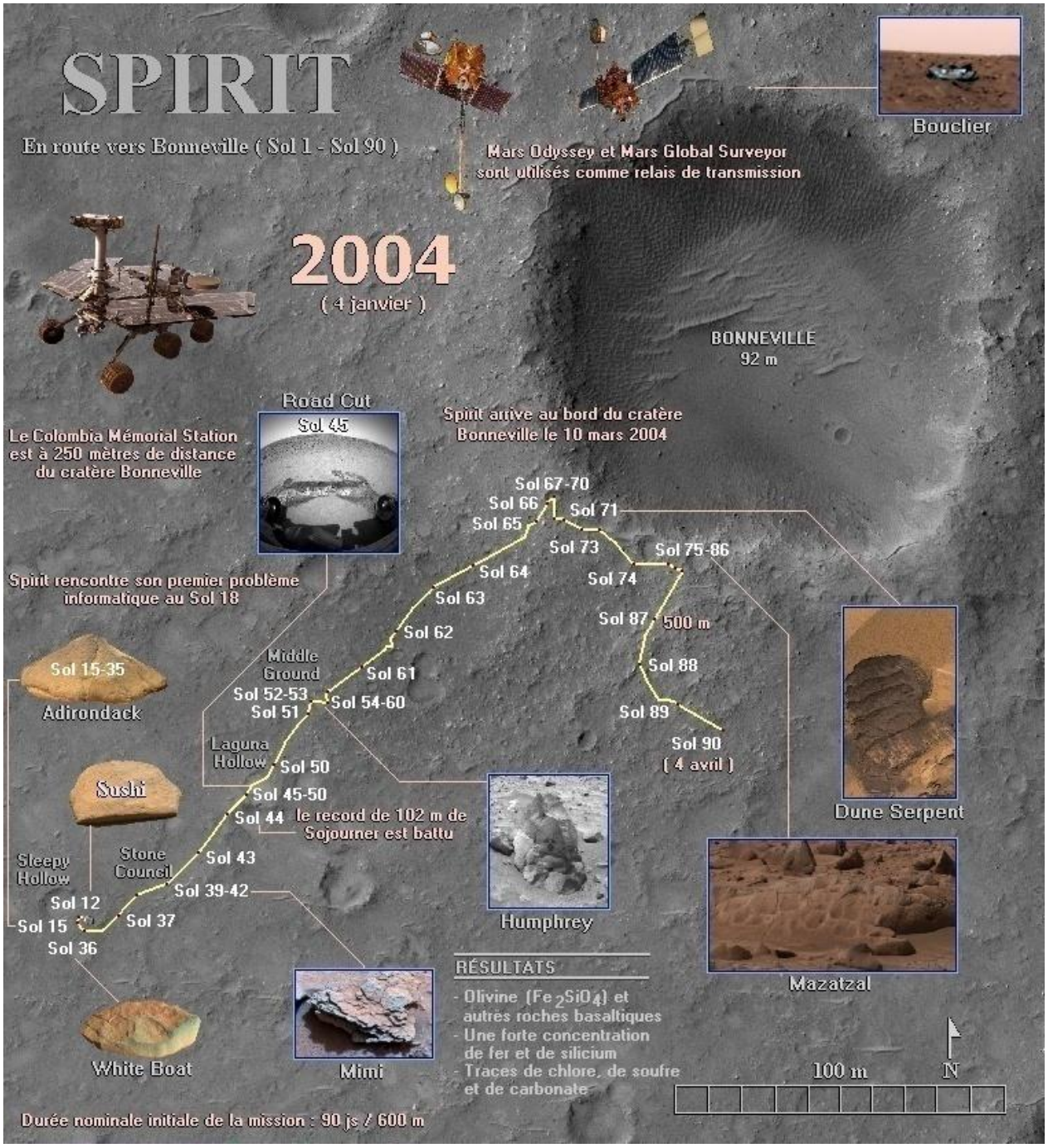


Planche 2 : Trajet de Spirit entre les Sols 1 et 90. La photo d'arrière-plan a été obtenue grâce aux données fournies par la caméra Hirise de Mars Reconnaissance Orbiter (MRO) le 22 novembre 2006. Position et trajet du rover guidé par les cartes de la Nasa et de Eduardo Tesheiner.

(le facteur Tau). Le système de navigation des rovers était également équipé de deux paires de petites caméras monochromes noir & blanc (HAZCAM) branchées en stéréo à l'avant (Front Hazcam) et à l'arrière (Rear Hazcam) sous le capot des rovers. Les caméras HAZCAM étaient utilisées pour éviter des obstacles sur le terrain, et pour diriger le déploiement des différents instruments scientifiques situés à l'extrémité du bras robotique des rovers. Sept petits aimants de puissances différentes étaient placés à différents endroits sur le capot des astromobiles, ils

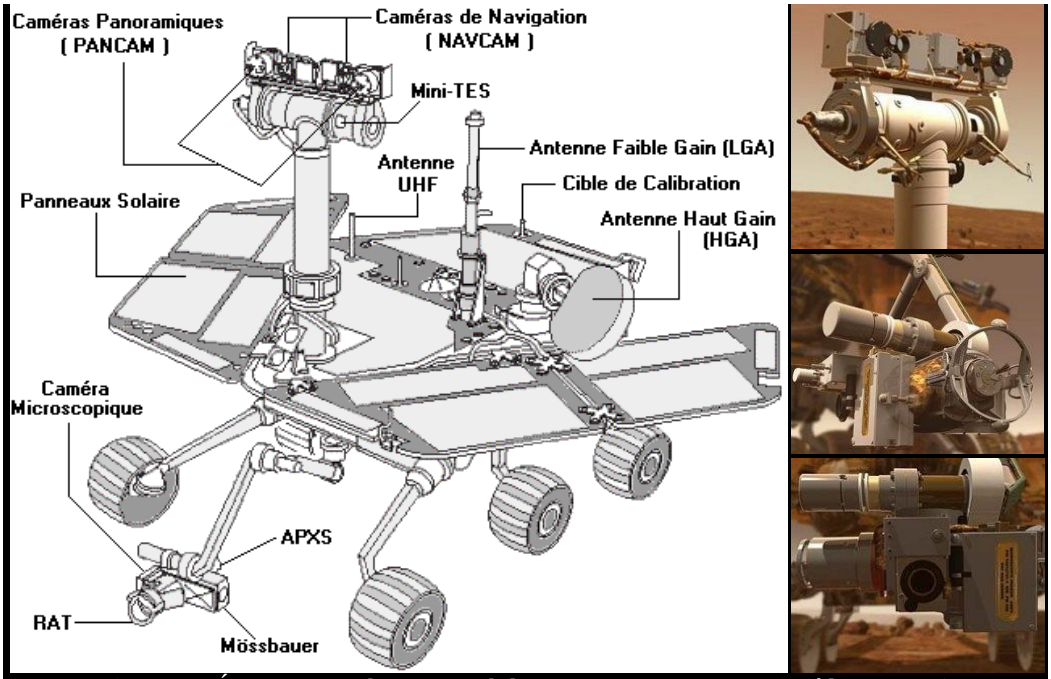


Figure 2 : Équipements des astromobiles Spirit et Opportunity (Crédit : NASA)

servaient à capturer des particules de poussière en suspension pour étudier leurs propriétés magnétiques. Les rovers étaient également munis d'un bras robotisé articulé très performant (IDD, Instrument Deployment Device), qui était équipé à son extrémité d'une tourelle rotative comprenant quatre instruments scientifiques très miniaturisés. Le bras IDD a été conçu pour imiter les mouvements d'un bras humain grâce à ses articulations et sa grande flexibilité (5 degrés de liberté). Il s'agit de l'outil d'abrasion RAT (Rock Abrasion Tool) capable de polir (RAT Brush) et de creuser (RAT Grind) sur des échantillons de sol et de roches à de faibles profondeurs, d'une caméra microscopique à fort grossissement (Remote Microscopic Imager : RMI), et de deux spectromètres. Un spectromètre APXS (Alpha Particle X-ray Spectrometer) à rayons X et particules alpha pour déterminer la composition élémentaire des roches et du sol, et un spectromètre Mössbauer à rayons gamma servant à identifier l'état d'oxydation des minéraux de type ferreux.

Spirit (MER-A) fut lancé du Cap Canaveral en Floride le 10 juin 2003 à 17h58 UTC (temps universel coordonné) par une fusée de type Delta II (Figure 1), soit près de quatre semaines avant le lancement de la mission jumelle Opportunity (MER-B). Après un long voyage de 497 millions de kilomètres parcourus en plus de 7 mois dans le vide et le froid sidéral de l'espace. Le module d'atterrissage de Spirit se pose finalement à la surface de la planète Mars le dimanche 4 janvier 2004 à 4h35 (UTC) du matin. Le site d'atterrissage est situé à 14,57° de latitude Sud par 175,47° de longitude Est à l'intérieur du grand cratère d'impact « Gusev » de 165 km de diamètre et de 1,6 km de profondeur. Le cratère « Gusev » est localisé à l'embouchure de l'immense vallée « Ma'adim Vallis », qui fait plus de 900 km de long sur 20 km de large par endroits (Planche 1). Spirit s'est posée à 250 mètres au sud-ouest du petit cratère d'impact « Bonneville » de 192 mètres de diamètre par 15 mètres de profondeur, et à plus de 3,2 km au sud-ouest d'un ensemble de petites collines qui a été baptisée « Columbia Hills ». Tout comme pour les missions Vikings et Mars Pathfinder, les jours d'explorations effectués à la surface de la planète Mars seront exprimés en Sol. Une journée martienne dure 24h38, et le premier Sol début

au moment de l'atterrissage à la surface de la planète. Les jours terrestres seront donc décalés quotidiennement de 38 minutes par rapport aux jours martiens (Sols), avec un décalage cumulé d'une journée terrestre (37 jours) à tous les 36 Sols martiens.

La séquence d'atterrissage débute par la séparation de Spirit de son module de croisière, et l'entrée dans l'atmosphère martienne s'effectue 15 minutes plus tard à une altitude de 128 km. Après une chute libre de quatre minutes, Spirit déploie son parachute de quinze mètres de diamètre à une altitude de 8,5 kilomètres, puis la sonde largue son bouclier thermique (Heat Shield) 20 secondes plus tard. Spirit gonfle ses airbags et allume ensuite les petites rétrofusées qui sont situées sous le bouclier arrière (Back Shell) à une altitude d'environ 200 mètres pour ralentir sa chute. Trois secondes plus tard, le câble du parachute est sectionné à douze mètres de la surface, et Spirit protégé par ses 24 airbags (technologie héritée de la mission Pathfinder) percute le sol, et rebondit une dizaine de fois avant de s'immobiliser complètement à 0,8 kilomètre de son point d'impact initial. La traversée de l'atmosphère martienne n'aura duré que six minutes en tout, mais un silence terrifiant pour les contrôleurs du centre de commande sur terre. C'était le début de l'été dans l'hémisphère sud de la planète au moment de l'atterrissage de Spirit, et les températures quotidiennes pouvaient descendre jusqu'à –80 °C la nuit et grimper vers les +20 °C le jour. Durant la durée de leur mission sur Mars, les rovers avaient la possibilité de communiquer directement avec la Terre ou de se servir des satellites en orbite autour de Mars comme relais de transmission. Il s'agit de Mars Globale Surveyor (MGS) lancé le 7 novembre 1996, de Mars Odyssey lancé le 7 avril 2001, de la sonde européenne Mars Express lancé le 2 juin 2003, soit 8 jours avant le lancement de Spirit, et de Mars Reconnaissance Orbiter (MRO) lancé le 12 août 2005 et qui s'est placé en orbite autour de la planète en mars 2006.

En route vers le Cratère Bonneville (Sol 1 à 90)

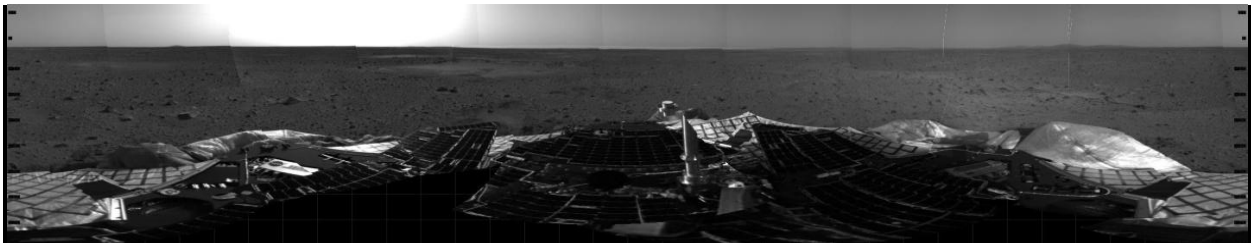


Figure 3 : Le premier panorama de Spirit pris au Sol 1 (Crédit : NASA/JPL)

Aussitôt le calme revenu sur le site d'atterrissage, Spirit envoie la commande pour dégonfler les airbags (coussins gonflables) protecteurs de la plate-forme d'atterrissage, ouvre les pétales qui enveloppent et protègent l'astromobile, et déploie ses panneaux solaires et son antenne parabolique (HGA). Les jours suivants seront tous consacrés au bon déploiement du robot Spirit, afin de tester ses différents instruments scientifiques et les logiciels de son système de navigation. Le même jour, Spirit transmet au centre de contrôle du JPL de Pasadena la première série d'image en noir et blanc prise par la PANCAM (Figure 3). Tout comme les images fournies par les missions Vikings en 1976 et par la mission Mars Pathfinder en 1997. L'image de la PANCAM du site d'atterrissage de Spirit dévoile un paysage qui est jonché de roches de toutes les tailles éparpillées sur le sol. Les roches du site d'atterrissage de Spirit sont en général plus

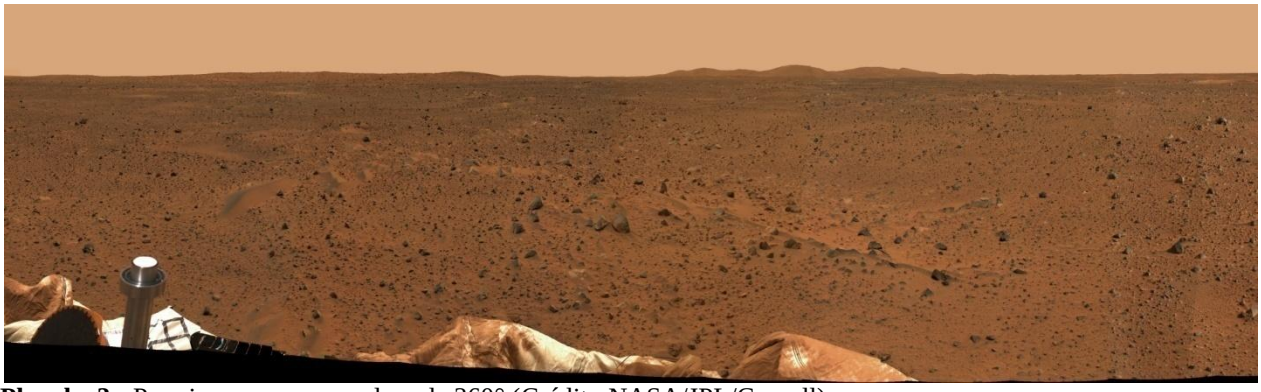


Planche 3 : Premier panorama couleur de 360° (Crédit : NASA/JPL/Cornell)

petites, et elles sont distribuées en moins grand nombre que sur les images fournies lors des missions précédentes. Le tout est recouvert par une fine couche de poussière de teinte rouille qui est déposée par les vents, et qui forme par endroits des petites dunes composées de sables très fins. On peut voir sur le sol à environ quinze mètres en avant du vaisseau porteur, qui sera rebaptisée par la suite « Columbia Memorial Station », une légère dépression de dix mètres de large baptisée « Sleepy Hollow » (cavité endormie). Le lendemain au Sol 2 (5 janvier), Spirit déploie le mât instrumental qui supporte les deux caméras panoramiques PANCAM de haute définition, les deux caméras de navigations NAVCAM, et le spectromètre infrarouge Mini-TES qui est destiné à étudier la composition minéralogique des roches et des échantillons de sol par l'analyse du rayonnement infrarouge naturel qu'il émet.

Sur le Sol 6 (9 janvier 2004), Spirit transmet la toute première image infrarouge du sol prise par la PANCAM couplée au spectromètre à émission thermique Mini-TES, et a révélé pour la première fois la présence d'une faible concentration de carbonate minéral contenu dans le sol martien. Les carbonates (CO_3^{2-}) se forment en général en présence d'eau sur Terre, mais sur Mars la faible teneur en carbonate est due à l'altération des roches basaltiques, qui implique des réactions photochimiques avec le rayonnement ultraviolet solaire sur des molécules d'eau et de CO_2 contenus dans l'atmosphère martienne. Mars possède une atmosphère faiblement ténue avec une pression à la surface d'environ huit millibars (soit moins de 1 % de celle de la Terre) qui varie aux fils du temps et des saisons, et elle contient une faible concentration en vapeur d'eau (0,03 %). C'est peut-être la raison qui explique la rareté des carbonates détectés à la surface de la planète rouge. Trois jours plus tard, soit le 12 janvier au Sol 9, Spirit transmet le premier panorama couleur de 360° composé d'une mosaïque de 225 images plus petites (Planche 3). Dans la partie supérieur de la moitié gauche de l'image de gauche, on peut voir la crête ouest du cratère « Bonneville » qui est situé à seulement 250 mètres au nord-est de l'atterrisseur, et vers le centre de l'image on peut voir les sept petites collines qui composent le complexe des « Columbia Hills » (Figure 4). Dans la partie gauche de l'image de droite de la Planche 3, on peut voir pointer à

Figure 4 : Les collines Columbia Hills (Crédit : NASA/JPL/Cornell)

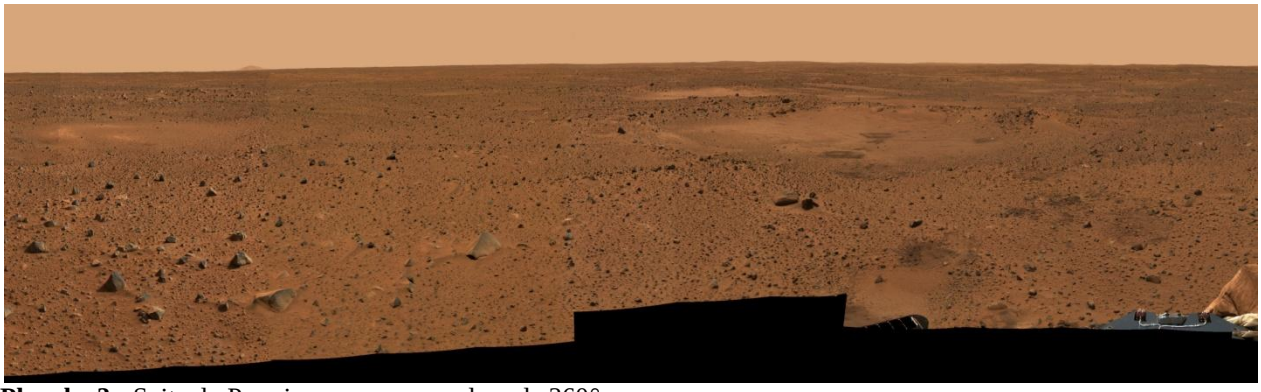


Planche 3 : Suite du Premier panorama couleur de 360°

l'horizon le sommet de « Grissom Hill » qui est situé à 7,5 km au sud-ouest de la plate-forme d'atterrissage. Et au pied de la petite dépression circulaire dénommée « Sleepy Hollow », on peut distinguer les roches « Sashimi » et « Sushi » (Figure 10), et un peu plus vers la gauche, la roche de forme pyramidale « Adirondack » (Figure 11).

Le complexe des « Columbia Hills » est un regroupement de sept petites collines, dont les sommets ont été nommés en l'honneur de l'équipage de la navette spatiale Columbia qui s'est désintégrée lors de son retour sur terre le 1er février 2003. Le sommet le plus à droite de la Figure 4 est « Ramon Hill » situé à environ 4,4 km de distance de Spirit, suivi à gauche par le sommet « Mc Cool » à 4,2 km et de « Husband Hill » (vers le centre de l'image). « Husband Hill » est situé à 3,2 km du site d'atterrissage de Spirit, et il est le plus haut des sommets du complexe avec une hauteur de 82 mètres. Vient ensuite le sommet de « Clark Hill » à 3 km, de « Chawla Hill » qui est également à 3 km, de « Brown Hill » à 2,9 km et de « Anderson Hill » qui est situé à 3,1 km. « Anderson Hill » est le plus bas des sommets du complexe avec seulement quelques mètres de hauteur. Le complexe des « Columbia Hills » est situé à environ 3,2 kilomètres au sud-est de la plate-forme d'atterrissage de Spirit, et il va constituer la deuxième cible d'intérêt géologique de l'astromobile après l'étude du petit cratère d'impact « Bonneville ». Spirit aura la chance au cours de sa longue mission sur Mars de gravir jusqu'au sommet de « Husband Hill ».

Figure 5 : Descente de Spirit (Crédit : NASA/JPL)

Le 15 janvier à 8 heure du matin sur le Sol 12, l'astromobile pivote sur lui-même de 120° vers la droite en direction de la rampe de descente nord, afin d'éviter un airbag qui s'est mal rétracté sous la rampe d'accès sud. Le rover équipé de ses six roues motrices quitte pour la première fois la plate-forme d'atterrissage, et roule trois mètres sur le sol martien avant de s'arrêter de nouveau, le temps de prendre des photos de contrôle avec ses caméras de navigation arrière (HAZCAM) d'évitement d'obstacles (Figure 5). Quelques heures après avoir descendu de sa plate-forme d'atterrissage, le rover Spirit prend les premières images du sol martien avec sa caméra microscopique (MI) qui est située à l'extrémité du bras robotique. Les trois prochains jours de la mission seront consacrés à l'étude du sol qui se trouve près du robot. L'olivine (Fe_2SiO_4) qui est un minéral d'origine volcanique, est détecté pour la première fois au Sol 14 (17 janvier) lors de l'analyse des premiers échantillons de sol effectuée par le spectromètre Mössbauer, qui est un instrument

Figure 6 : Sashimi et Sushi (Sol 12) **Figure 7 :** Adirondack (Sol 15-35) **Figure 8 :** White Boat (Sol 36) **Figure 9 :** Mimi (Sol 40)
(Crédit : NASA/JPL/Cornell)

qui fournit des renseignements sur l'état d'oxydation des minéraux contenant du fer (Fe^{2+}/Fe^{3+}). Le spectromètre APXS qui permet d'obtenir la composition élémentaire des matériaux de surface, a également détecté une forte concentration de fer et de silicium dans la composition du sol martien, avec des traces de chlore et de soufre. Les sels de chlorure et de sulfate pourraient agir comme ciments, ou de colle électrostatique entre les grains de poussière.

Au Sol 15 (18 janvier), trois jours après avoir posé ses roues sur le sol martien, Spirit se prépare à analyser la roche de forme pyramidale dénommée « Adirondack » (Figure 7) qui se trouve à trois mètres à l'ouest des roches « Sashimi » et « Sushi » (Figure 6). La roche « Adirondack » est la première roche qui sera analysée par les trois spectromètres du rover, et qui demandera pour la première fois l'utilisation de la fraiseuse RAT pour effectuer des analyses plus en profondeur. L'étude de la roche « Adirondack » nous a renseignées un peu plus sur les différents minéraux d'origine basaltique qui composent les roches martiennes. Le lendemain au Sol 16, le rover prend une mosaïque de 12 images de sa plate-forme d'atterrissage (Figure 10), et effectue des mesures sur une parcelle de sol se trouvant juste devant lui avec le spectromètre Mössbauer et le spectromètre à rayons X et à particules alpha (APXS). Sur le Sol 17, il est prévu d'utiliser tous les spectromètres sur la roche « Adirondack » avant l'utilisation de la RAT sur le Sol suivant, et le spectromètre Mössbauer doit être placé pour une longue intégration nocturne sur la roche. Le rover fait une découverte inattendue à partir des mesures du spectromètre Mössbauer effectué sur la parcelle de sol avec la détection d'une quantité considérable d'olivine (Fe_2SiO_4). Il s'agit d'un minéral silicaté composé de silicium, d'oxygène, de fer et de magnésium que l'on trouve dans les roches ignées, les roches volcaniques et les laves basaltiques. La présence d'une forte concentration d'olivine entrant dans la composition de la parcelle de sol étudiée est la preuve d'une absence d'altération chimique sur de longue période.

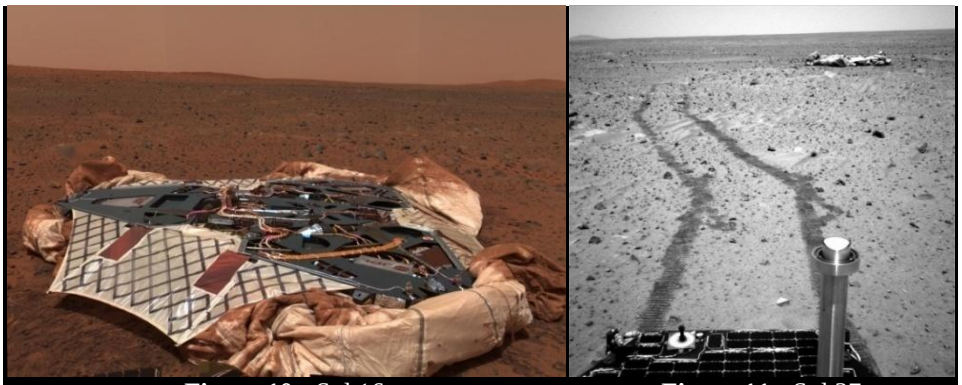


Figure 10 : Sol 16 **Figure 11 :** Sol 37
(Crédit : NASA/JPL/Cornell)

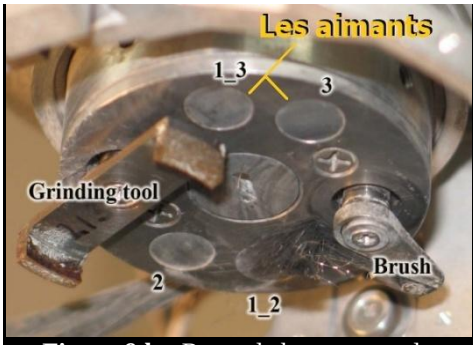


Figure 9 b : Rotor de brossage et de broyage de la RAT

Puis soudain, c'est la catastrophe dès le lendemain sur le Sol 18 (21 janvier). Le contact radio avec Spirit est interrompu et l'astromobile ne transmet plus aucune donnée vers la Terre. La panne semble être causée par un mauvais fonctionnement de la mémoire flash du rover, qui est une mémoire de masse réinscriptible qui persiste même sans alimentation. La mémoire flash est l'une des trois différents types de mémoire utilisé par l'ordinateur de bord de Spirit, en plus de la mémoire vive ou volatile car non persistance (RAM) et de l'EEPROM (mémoire programmable effaçable). Ce type de problème de communication avait déjà été rencontré à plusieurs reprises lors de la mission de Mars Pathfinder en 1997. Pour corriger le problème, Spirit a activé ses procédures de sécurité en réamorçant son système informatique de bord. Mais sans une intervention extérieure, le petit robot restait coincé dans une boucle récursive qui le faisait redémarrer sans arrêt (125 fois). Durant ce temps, de l'autre côté de la planète, le rover Opportunity (le frère jumeau de Spirit) se posait avec succès à la surface de la planète Mars le 24 janvier 2004 dans « Terra Meridiani » (voir le chapitre suivant).

Une semaine après le silence radio, le problème semble enfin résolu au Sol 26 (29 janvier) et Spirit communique de nouveau avec la Terre. Pour corriger le problème les ingénieurs de la NASA en profitent pour lui transmettre un programme tout neuf le 5 février au Sol 33, et ils donnent l'ordre au robot de réinitialiser son ordinateur RAD 6000 de 32 bits en utilisant uniquement la mémoire volatile (RAM). L'astromobile reprend alors son travail d'analyse sur la roche « Adirondack » avec une séance de brossage au Sol 30 et 33 pour nettoyer la roche, puis le robot utilise pour la première fois son outil d'abrasion RAT au Sol 34 pour creuser une surface de4,55 cm de diamètre sur 2,7 millimètres de profondeur sur la cible « Prospect ». La caméra microscopique (RMI) photographie les effets du brossage à l'intérieur du trou fraîchement creusé, et les spectromètres Mössbauer et APXS ont dévoilé durant la nuit une forte concentration de minéraux d'origine volcanique, dont l'olivine (Fe_2SiO_4), le plagioclase et le pyroxène ($FeSiO_3$). Le spectromètre APXS émet des particules alpha et des rayons X, et il fait par la suite l'analyse des rayonnements X ou alpha qui sont émis par les échantillons irradiés. Le même jour, Spirit effectue son premier test de télécommunication de proximité UHF avec la sonde Mars Express de l'agence spatiale européenne (ESA).

Au Sol 36 le 9 février à 10h30 heure locale de Mars, par une froide matinée martienne de –45 °C. L'astromobile Spirit s'éloigne de la roche « Adirondack » pour se diriger au sud-est vers la roche « White Boat » (Figure 8), et le rover parcourt seul pour la première fois une distance de 6,37 mètres en mode automatique, assisté uniquement de ses caméras de navigation et de ses logiciels d'imageries. Les rovers Spirit et Opportunity étaient équipés de six petites caméras de navigation qui étaient montées en stéréo par groupe de deux. Soit deux paires de caméras à petit angle (HAZCAM) fixées à l'arrière et à l'avant sous le capot du véhicule. Ses caméras de navigation permettaient de visualiser le relief du terrain qui se trouvait juste devant les roues des rovers. Les deux dernières caméras de navigation (NAVCAM) étaient fixées sur la tête du mât des rovers, il s'agit de caméra à grand angle de faible résolution couplée en stéréo. Ce dispositif complexe de caméra de navigation permettait au système de navigation et d'imagerie virtuelle de dresser des cartes numériques en relief 3D du terrain, ce qui donnait la capacité à l'intelligence

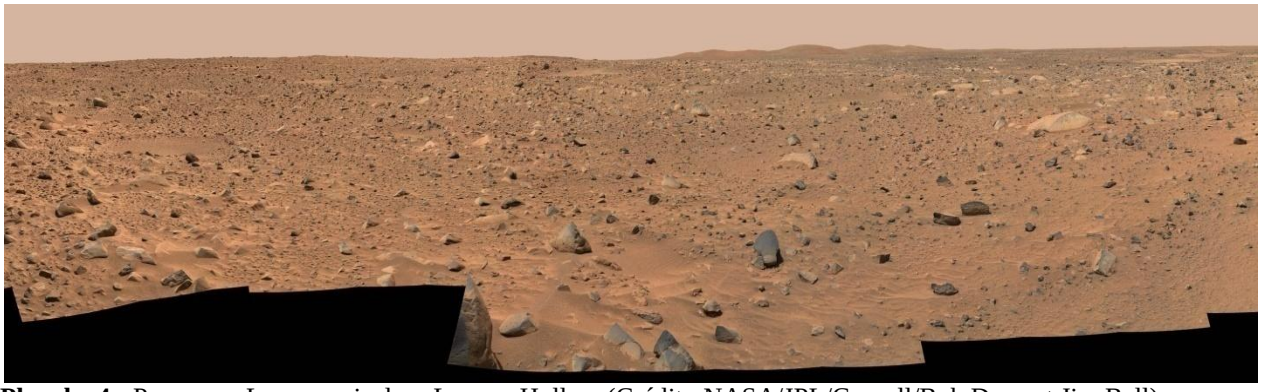


Planche 4 : Panorama Legacy pris dans Laguna Hollow (Crédit : NASA/JPL/Cornell/Bob Deen et Jim Bell)

Figure 12 : Sol 43, vue avant donnant sur Laguna Hollow (Crédit : NASA/JPL/Cornell)

artificielle des rovers de pouvoir planifier seule des déplacements de courte distance sur le sol martien (AutoNav). Les astromobiles pouvaient évaluer au besoin le contournement et l'évitement de petits obstacles qui se trouvaient devant eux, et en cas de doute, ils étaient programmés pour attendre de nouvelles instructions venant de la Terre. Le robot choisit la trajectoire la plus sûre, avance d'une courte distance (entre 0,5 et 2 mètres), s'arrête, reprend des photos pour actualiser sa carte numériques 3D, et recommence.

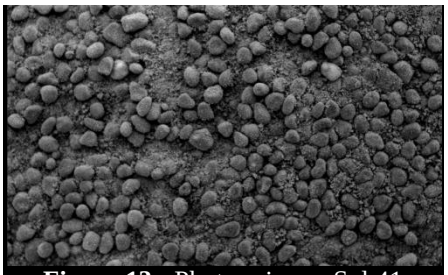


Figure 13 : Photo prise au Sol 41 (Crédit : NASA/JPL/Cornell/USGS)

Le lendemain sur le Sol 37, Spirit contourne la plate-forme d'atterrissage par le sud-est pour ensuite se diriger vers le nord-est en direction du cratère d'impact « Bonneville » (Figure 11). Durant le trajet l'astromobile bat le record de distance parcourue en une seule journée de sept mètres détenu par le petit robot Sojourner, en parcourant en mode automatique une distance de 21,2 mètres. Deux jours plus tard au Sol 39 (12 février), Spirit s'approche d'un intéressant ensemble de petites roches baptisé « Stone Concil », que le robot analysera aux Sols suivants avec ses différents instruments. Au Sol 42, après avoir photographié des concrétions minéral de forme sphérique qui recouvrent le sol martien (Figure 13), et qui seront dénommées plus tard myrtille ou blueberries. Spirit se positionne en face de la roche stratifiée« Mimi » (Figure 9) qui est située au centre de l'amas de pierres « Stone Concil », et déploie ses instruments de mesure pour procéder à son analyse complète. Le 16 et le 17 février (Sol 43 et 44), le rover transmet deux nouveaux clichés panoramiques du sol martien, et on peut voir sur la première image la dépression « Laguna Hollow » (Figure 12) vers laquelle se dirige l'astromobile, et sur la deuxième image (Figure 14) on peut voir les traces du robot Spirit sur le sol qui indique la direction où se trouve le module d'atterrissage, qui est situé juste à droite du sommet de « Grissom Hill » qui pointe au loin à l'horizon.

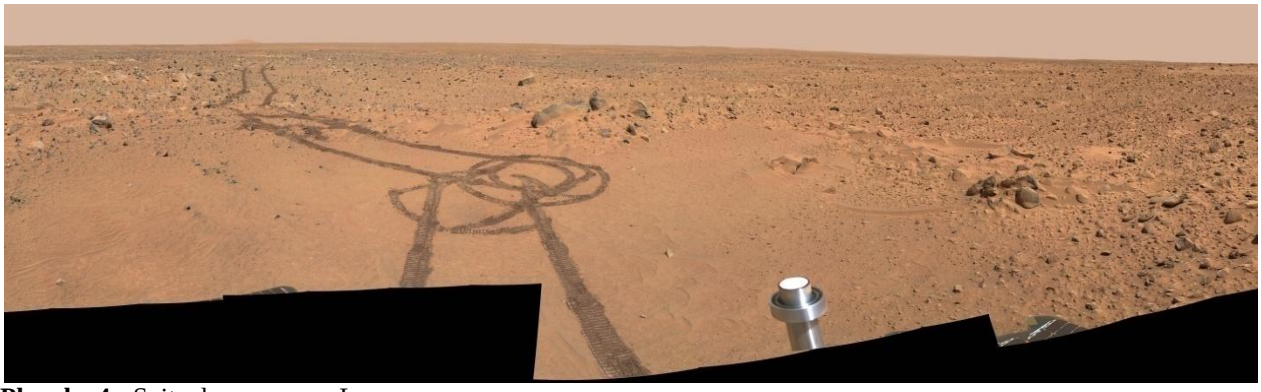


Planche 4 : Suite du panorama Legacy

Figure 14 : Sol 44, vue arrière donnant sur le site d'atterrissage (Crédit : NASA/JPL)

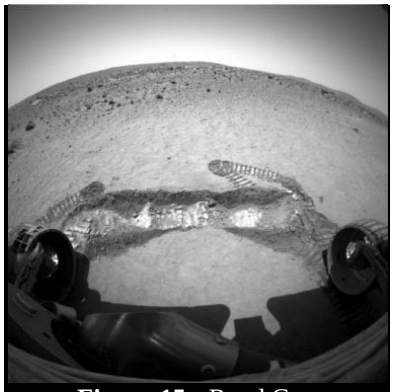


Figure 15 : Road Cut (Crédit : NASA/JPL)

Le 17 février sur le Sol 44, l'astromobile avait déjà parcouru une distance de 108 mètres depuis son arrivée sur Mars, dépassant ainsi le record précédent de distance parcourus sur une autre planète durant une mission, qui était de 102 mètres détenu jusqu'ici par le petit robot Sojourner lors de la mission de Mars Pathfinder de 1997. La dépression « Laguna Hollow » et les autres petites dépressions de forme circulaire que l'on peut apercevoir sur le sol martien, comme « Sleepy Hollow » qui est situé à dix mètres au nord-ouest de la plate-forme d'atterrissage de Spirit. Sont en réalité d'anciens petits cratères d'impacts creusés par des débris rocheux qui ont été éjectés lors de la formation des cratères plus grands qui se trouvent à proximité, et qui ont subi par la suite l'érosion éolienne sur une longue période de temps en se remplissant de fine poussière et de sable poussés par les vents martiens. Les roches et les pierres que l'on retrouve éparpillées un peu partout sur le sol martien, sont également des produits d'impacts qui proviennent de la formation des différents cratères qui se trouvent à proximité, comme lors de la création du cratère « Bonneville » ou du cratère « Missoula » de 90 mètres de diamètre qui se trouve plus loin au nord-est (voir Planche 1). Après avoir effectué l'analyse de plusieurs échantillons de sols et de roches sur le site « Stone Concil » (Peak, Ramp Flats, V Ger et Broken Slate). Spirit reprend la route vers le cratère « Bonneville » au Sol 45 (18 février), et rejoint la petite dépression « Laguna Hollow » d'une quinzaine de mètres de diamètre.

Le rover est maintenant rendu à mi-chemin de la durée de vie nominale de 90 jours qui avait été initialement prévue pour la mission, et il a parcouru une distance de 131 mètres à la surface de la planète Mars depuis qu'il a quitté son site d'atterrissage. L'astromobile en profite pour bloquer cinq de ses roues motrices au milieu de la dépression « Laguna Hollow », tout en laissant tourner sa roue avant gauche pendant 2 heures, dans le but de remuer le sol et de creuser

Figure 15 b : Zoom du donnant sur le site d'atterrissage

une petite tranchée de 7 à 8 cm de profondeur qui sera nommé plus tard « Road Cut » (Figure 15). Le rover déploie ensuite son bras robotique pour exposer à tour de rôle les trois instruments scientifiques qui sont fixés à son extrémité, puis il entame une série d'analyses complètes du sol qui a été mis à découvert dans la tranchée. Cette opération sera reprise deux jours plus tard sur le Sol 47 (20 février), avec en prime une nouvelle série d'analyses de plusieurs jours de la tranchée. Après avoir fini l'étude de la tranchée « Road Cut » sur le Sol 50 (23 février), Spirit reprend la route vers le nord-est en direction du cratère « Bonneville ». Le rover s'arrête après avoir parcouru une courte distance de 19 mètres, le temps de faire l'étude d'échantillons qui se trouve sur le sol entre « Laguna Hollow » et « Middle Ground » avec son spectromètre à émission thermique Mini-TES. L'astromobile se dirige ensuite vers « Middle Ground » qui se trouve 50 mètres plus loin, et qu'il atteindra trois jours plus tard au Sol 53 (26 février).

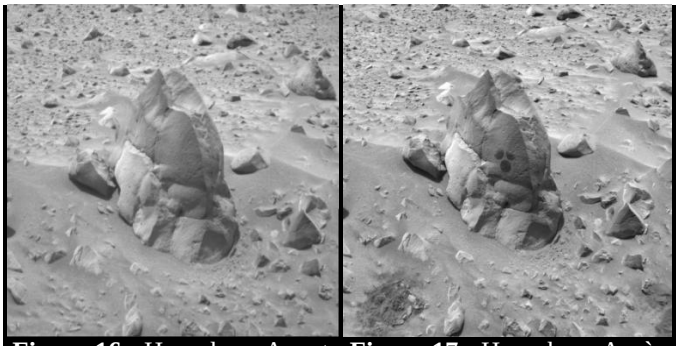


Figure 16 : Humphrey Avant **Figure 17 :** Humphrey Après
(Crédit : NASA/JPL & NASA/JPL/Cornell/USGS)

Le 29 février sur le Sol 55, l'astromobile Spirit entame l'étude détaillée de la roche « Humphrey » (Figure 16 et 17) qui se trouve à environ 100 mètres de distance du site d'atterrissage, et que l'astromobile complétera six jours plus tard sur le Sol 61 (5 mars). La roche « Humphrey » d'une hauteur de 0,6 mètre, est l'un des plus gros rochers qui a été aperçu par les caméras du rover jusqu'à maintenant. Spirit effectue trois brossages à des endroits différents sur la roche (Sol 55) et deux broyages (Sol 58 et 59), tout en effectuant à plusieurs reprises des analyses avec ses différents instruments scientifiques. La texture de la roche présente tous les aspects d'une roche basaltique, qui aurait été éjectée et projetée dans les airs avec violence lors d'un impact avec une météorite de grande taille qui aurait créé jadis l'un des cratères qui se trouvent aux alentours, comme le cratère « Bonneville ». La roche « Humphrey » qui a une forme très anguleuse, présente à sa surface de nombreuses petites fissures pouvant endommager la petite fraiseuse (RAT) de Spirit, comme si cette roche avait été fracassée après avoir subi plusieurs chocs très violents avec d'autres corps rocheux plus petits.

Certaines petites roches qui se trouvent sur le sol à la base de « Humphrey », semblent être des morceaux de roche qui se seraient détachés après avoir été percutés de plein fouet par d'autres projectiles rocheux plus petits. Si c'est bien le cas, ce scénario semble vouloir indiquer que la roche « Humphrey » serait beaucoup plus vieille que certains petits cailloux qui l'entourent. Le rover nous prépare à partir du Sol 59 une magnifique vue panoramique couleur de

Figure 18 : Panorama Middle Ground (Crédit : NASA/JPL)

360° de « Laguna Hollow » baptisée « Legacy » (Planche 4), et que Spirit finira de cadrer trois jours plus tard sur le Sol 61. Le panorama « Legacy » est composé d'une mosaïque de 78 images plus petites qui ont été prises à travers 5 filtres de couleurs différentes, et qui dévoilent toute la beauté du paysage martien qui se trouve à la hauteur de la petite dépression « Laguna Hollow ». La figure 15:b nous montre un zoom extrait de l'image de droite de la planche 4, avec à gauche le sommet de « Grissom Hill » et à droite la plate-forme d'atterrissage de Spirit qui se trouve à environ 100 mètres de distance. Après l'étude de la roche le rover Spirit reprend la route au Sol 61 (6 mars) en direction de la crête sud-ouest du cratère « Bonneville », et il transmet le même jour le magnifique panorama noir et blanc « Middle Ground » (Figure 18), qu'il avait entamé plus tôt sur le Sol 59.

Spirit vient de dépasser le deuxième tiers de la durée de vie nominale de sa mission, et il a parcouru jusqu'à maintenant une distance de 195 mètres à la surface de la planète rouge, soit près du tiers des 600 mètres qui avaient été initialement prévus. Il ne reste plus que 55 mètres à parcourir avant d'atteindre enfin la crête sud-ouest du cratère « Bonneville ». Spirit entame son sprint final vers le cratère sur une pente qui est de plus en plus abrupte et rocailleuse, avec un angle d'inclinaison de plus de 15° par endroits. Le rover s'arrête quelque temps au Sol 65 (10 mars) pour faire des analyses d'échantillons de sol avec ses différents spectromètres, et il photographie pour la première fois avec ses caméras de navigation avant, le bord de la crête sud-ouest du cratère d'impact « Bonneville » qui pointe déjà à l'horizon. Il ne reste plus que 21 mètres à parcourir sur le Sol 66 (11 mars), avant que le rover n'atteigne finalement la crête sud-ouest du cratère « Bonneville » dès le lendemain au Sol 67. Avec en prime, une magnifique vue plongeante qui donne directement accès sur les dunes de sable qui se trouvent sur le plancher intérieur du cratère (Figure 19).

La nuit tombe sur Mars et l'astromobile en profite pour se préparer à passer une longue nuit d'observation du ciel nocturne martien. Le rover prend des photos de longues expositions des étoiles de la constellation d'Orion, qui seront utilisées par la suite pour vérifier et ajuster le traitement du système de positionnement avec les logiciels de navigation. Clichés que Spirit transmettra dès le lendemain à la Terre par l'intermédiaire de la sonde Mars Global Surveyor (MGS). Le passage de la sonde Mars Global Surveyor (MGS) dans le ciel martien a également permis de faire une étude jumelée du facteur Tau, qui mesure l'opacité de l'atmosphère, et qui a été réalisée à partir du spectromètre à émission thermique Mini-TES du rover et par le spectromètre infrarouge (TES) embarqué sur la sonde MGS. Cette expérience sera par la suite effectuée à plusieurs autres reprises au cours de la mission de Spirit sur Mars. Les pentes du versant intérieur du cratère « Bonneville » sont très abruptes, ce qui pourrait présenter un réel danger pour le futur de la mission de Spirit sur Mars. Et vu de la bonne santé du rover, et de l'absence d'affleurements rocheux sur les parois internes du cratère. La décision fut prise de ne pas prendre le risque de faire descendre l'astromobile à l'intérieur du cratère, de peur qu'il

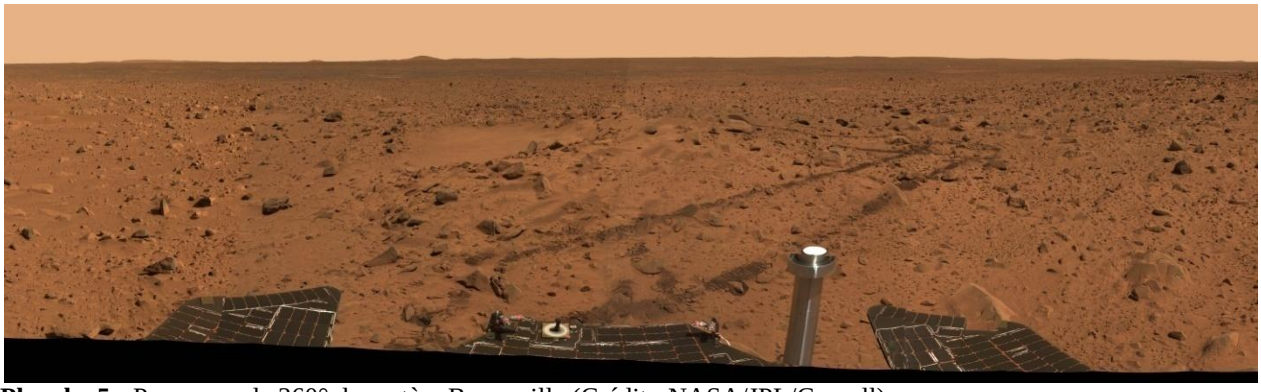


Planche 5 : Panorama de 360° du cratère Bonneville (Crédit : NASA/JPL/Cornell)

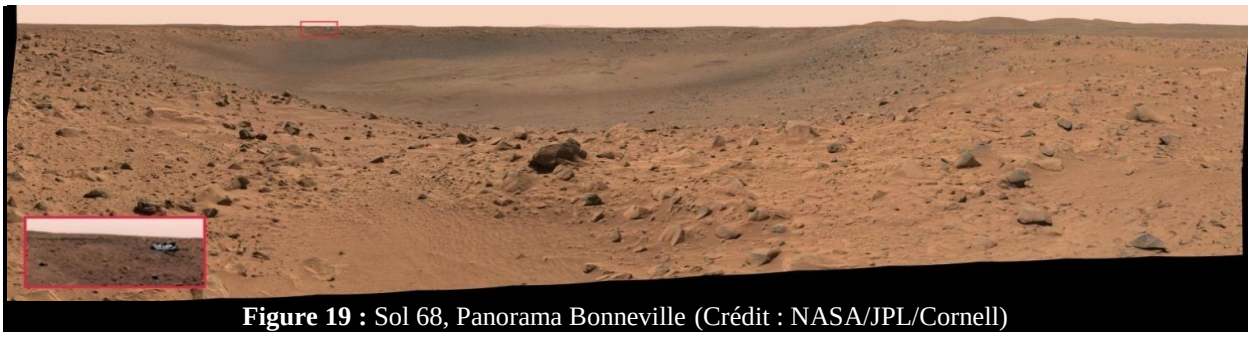


Figure 19 : Sol 68, Panorama Bonneville (Crédit : NASA/JPL/Cornell)

s'enlise et qu'il y reste coincé pour toujours.

La prochaine cible d'intérêt géologique de Spirit sera donc les « Columbia Hills », qui se trouvent à plus de 3 km au sud-est du cratère « Bonneville » à travers une plaine basaltique qui est criblée de cratères. Le rover Spirit photographie le transite de la lune Deimos lors de son passage devant le soleil, et termine le magnifique panorama couleur de 360° du cratère « Bonneville » au Sol 68 (Figure 19 et Planche 5). Sur le cliché de la figure 19, on peut voir un zoom dans la partie inférieure de l'image qui donne sur le bouclier thermique qui se trouve à plus de 200 mètres sur la crête opposée du cratère. Les « Columbia Hills » sont visibles à droite du cratère dans les deux images, et avec un fort grossissement de l'image de gauche de la Planche 5, on peut voir la plate-forme d'atterrissage de Spirit qui se trouve à droite du sommet de « Grissom Hill ». Le 15 mars au Sol 70, Spirit fait 43 analyses séparées de la cible « Gobi 1 » avec son spectromètre Mössbauer, ce qui constitue un record d'analyses effectuées dans une même journée pour les deux missions MER sur la planète Mars.

Le lendemain sur le Sol 71, Spirit se déplace de 20 mètres le long de la crête sud-ouest du cratère, et traverse une petite dune de quelques centimètres de haut qui a été baptisée « Serpent » (Figure 20). Le rover creuse une petite tranchée sur la dune avec sa roue avant gauche au Sol 72, puis le robot entame par la suite une série d'analyses jusqu'au Sol 74. La teinte du sol à l'intérieur de la tranchée et à l'intérieur des traces du rover laissées au sol (Figure 21 et 22), est beaucoup plus foncée que la fine couche de poussière (régolithe) qui recouvre le sol martien tout autour. Cette fine couche de poussière qui donne la teinte rouge à la planète est d'une épaisseur de quelques micromètres seulement, et elle est composée essentiellement d'hématite (Fe_2O_3). La couche superficielle est oxydée sur quelques micromètres par des réactions chimiques impliquant le peroxyde d'hydrogène (H_2O_2) et des silicates d'origines volcaniques (Olivine, Pyroxène), qui

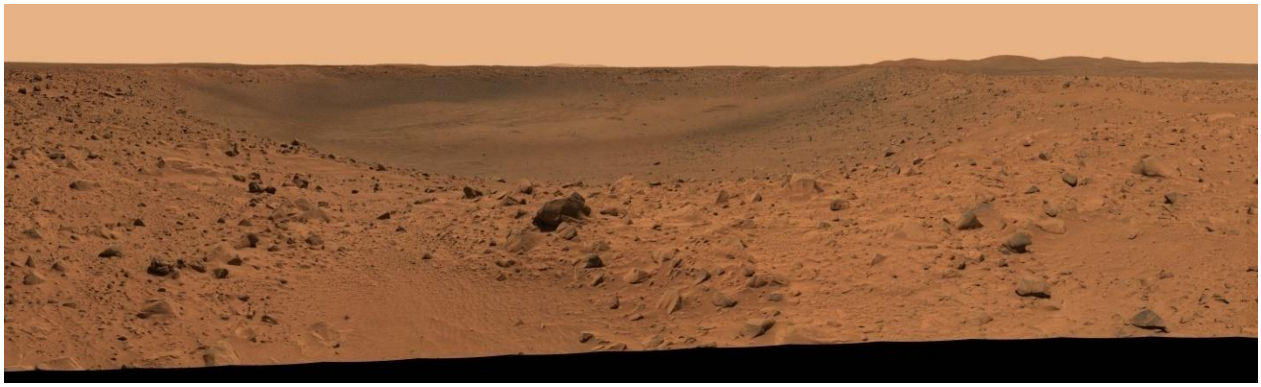


Planche 5 : Suite du panorama du cratère Bonneville.

Figure 20 : Dune Serpent (Crédit : NASA/JPL)

Figure 21 et 22 : La dune Serpent (Crédit : NASA/JPL et NASA/JPL/Cornell)

finit à la longue par former une fine couche d'hématite. Le peroxyde d'hydrogène est un superoxyde très oxydant, et il est formé dans l'atmosphère martienne par le rayonnement ultraviolet solaire qui photolyse des molécules d'eau. La présence d'olivine, qui est un minéral d'oxyde de fer très instable en présence d'eau, indique clairement que la formation d'hématite à la surface de la planète est de type anhydre (une substance chimique ou un minéral qui ne contient aucune molécule d'eau dans sa structure). La composition minéralogique de la dune « Serpent » et des petites roches qui se trouvent à proximité est d'origine basaltique anhydre. Et ce matériau s'est formé dans un milieu très sec, tout comme la plupart des roches et des échantillons de sols qui ont été analysés par Spirit jusqu'à présent. Ses résultats d'analyses semblent vouloir indiquer que cette région de la planète Mars est géologiquement inactive depuis plusieurs milliards d'années.

Après avoir parcouru une distance de 64,3 mètres entre les Sols 74 et 77, Spirit entame une série d'analyses complètes sur la roche sédimentaire « Mazatzal » (Figure 23, 24 et 24:b) entre les Sols 78 et 86. La séquence d'analyse inclut le brossage de la roche au Sol 79 sur les cibles « Illinois » et « New York », et d'un premier broyage de « New York » au Sol 81 d'une durée de trois heures et quarante-cinq minutes atteignant une profondeur de 3,79 mm. Suivit deux jours plus tard au Sol 83 d'une deuxième séance de broyage effectué au même endroit mais à un angle légèrement différent du premier broyage (baptisé « Brooklyn »), d'une durée de trois heures et 23 minutes atteignant une profondeur de 4,1 mm. Les deux séances de broyage ont

permis d'atteindre une profondeur record de presque 8 mm (Figure 24:b mosaïque de quatre images de l'imageur microscopique de Spirit). Et avant de quitter la roche « Mazatzal » au Sol 86, l'astromobile a utilisé une dernière fois son outil d'abrasion RAT pour brosser sur la roche une mosaïque en forme de marguerite à cinq pétales baptisée « Missouri ». « Mazatzal » est le plus gros rocher que Spirit a rencontré jusqu'à maintenant à la surface de la planète, et il s'agit d'une roche sédimentaire qui a une forme et une texture très différente des autres gros rochers que Spirit a pu étudier sur son trajet, comme « Humphrey » et « Adirondack ». La texture de « Mazatzal » semble indiquer que cette roche résulte de la sédimentation de dunes de sable qui a été fortement érodée par l'action du vent, et que sa composition chimique est semblable à celle des autres roches basaltiques qui ont été étudiées jusqu'ici. Au Sol 87 (2 avril), Spirit se remet en route vers le sud-est en direction des « Columbia Hills » et franchit le même jour le cap des 500 mètres parcourus à la surface depuis son arrivée sur la planète.

Figure 23 : Mazatzal avant

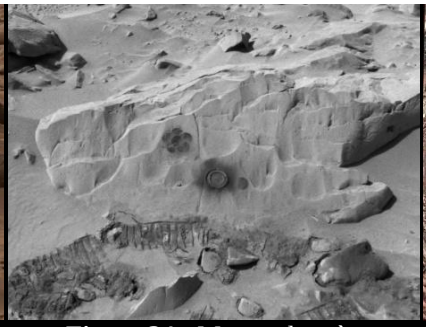


Figure 24 : Mazatzal après

Figure 24 b : New York Sol 85

(Crédit : NASA/JPL-Caltech & Cornell pour l'image de droite)

Les différents panoramas sont pris en fin de journée le temps pour Spirit pour recharger ses batteries chaque jour depuis le lever du soleil, car la prise d'une série d'images pour construire une vue panoramique est très énergivore et demande un long temps de recharge. Deux jours plus tard sur le Sol 89, le rover dépasse les 600 mètres parcourus à la surface de la planète Mars, franchissant ainsi le premier critère qui pouvait garantir la réussite de la mission sur Mars. L'astromobile Spirit met fin à la première étape de sa mission d'exploration de la surface martienne le lendemain au Sol 90 le 4 avril 2004, dépassant du même coup la durée de vie nominale de 90 jours qui était le deuxième critère qui pouvait garantir le succès de la mission sur Mars. Le rover Spirit qui est en très bon état de fonctionnement et qui est toujours capable de rouler sur le sol martien, va tranquillement descendre la crête sud-ouest du cratère d'impact « Bonneville » avant de poursuivre son long périple à travers les plaines basaltiques de « Gusev », et de rejoindre les « Columbia Hills » qui se trouvent à plus de 2,4 kilomètres plus loin.

L’altération de l'Olivine en ses produits secondaire

L'olivine $(Mg, Fe)_2SiO_4$ est un silicate de fer et de magnésium chimiquement instable, et est le tout premier minéral à se dissoudre et à se décomposer en présence d'eau liquide à basse température en milieu océanique ou de surface qui libère du fer en solution. Elle s'altère rapidement pour se transformer en d'autres minéraux, comme la serpentine $(Mg, Fe)_3Si_2O_5(OH)_4$ via la réaction de serpentinisation en eau chaude ou souterraine qui produit de grandes quantités de dihydrogène et du méthane (CH_4), si le dihydrogène rencontre du CO_2. Des argiles comme la smectite (en contact avec de l'eau à pH neutre ou alcalin/basique), ou des oxydes de fer. Le dihydrogène (H_2) libéré lors de la serpentinisation peut servir d’amorce à une source d'énergie vitale, comme pour les bactéries primitives des abysses qui l'utilisent pour fabriquer du méthane. L'olivine est un minéral volcanique magmatique primaire très abondant dans la croûte basaltique martienne originale, et elle contient beaucoup de fer de forme réduite (ion ferreux Fe^{2+}). Son contact avec l'eau dans un environnement légèrement oxydant va provoquer l'oxydation et la précipitation du fer dans une réaction rédox (oxydoréduction) en cédant un électron pour donner un ion ferrique (Fe^{3+}), soit la forme la plus oxydée et la plus stable pour les atomes de fer (pouvant établir un plus grand nombre de liaison chimique).

L'olivine s'altère d'abord en magnétite (Fe_3O_4) sous la surface par lessivage des eaux souterraines peu oxygénées, il s'agit d’un minéral hautement magnétique de teinte noire ou brun-noir. La magnétite est un oxyde de fer mixte contenant à la fois du fer ferreux (Fe^{2+}) et du fer ferrique (Fe^{3+}). Si les conditions environnementales deviennent plus ouvertes à l'atmosphère et que l'eau persiste, cela donne naissance à des minéraux d’oxyde de fer de couleur rouge/orangée comme la goethite ou l’hématite (rouille). La goethite (FeO(OH)) est la forme hydratée de l’hématite (Fe_2O_3) évoluant dans un environnement frais et humide, et l’hématite est la forme déshydratée de la goethite évoluant dans un milieu chaud et sec, l’une et l’autre se transformant selon les conditions climatiques et environnementales. Si l'eau est plus acide et riche en CO_2 dissous (ce qui était le cas dans l'atmosphère primitive de Mars), l'altération de l'olivine capte du carbone pour former des carbonates de fer et de magnésium sous forme solide (processus de carbonatation et de piégeage du CO_2), comme la magnésite ($MgCO_3$). Ces variations minéralogiques servent de marqueurs climatiques majeurs sur la persistance de l'eau liquide pour les scientifiques de la NASA, permettant de retracer l'évolution de Mars d'une planète active et humide vers le désert aride et oxydé qu'elle est aujourd'hui.

DE BONNEVILLE À WEST-SPUR (Sol 91 à 156)

La route vers les « Columbia Hills » ne sera pas de tout repos, et Spirit devra franchir plusieurs obstacles avant d'atteindre « West-Spur » qui se trouve à la base de « Husband Hill ». L'astromobile devra parcourir plus de 2,7 kilomètres dans une plaine basaltique criblée de petits cratères d'impacts, et remplie de roches de différentes tailles pouvant à tout moment abîmer ou immobiliser le rover à tout jamais (Planche 6). Le 8 avril 2004 sur le Sol 94, la NASA vote le prolongement des missions MER pour une durée supplémentaire de 6 mois jusqu'en septembre 2004. Et pour donner plus de chance aux robots d'accomplir leur nouvelle mission sur Mars, les ingénieurs de la NASA ont prévu de faire de nouvelles mises à jour de leurs logiciels de navigation, afin d'améliorer leurs performances et de rendre les rovers plus rapides sur le terrain.

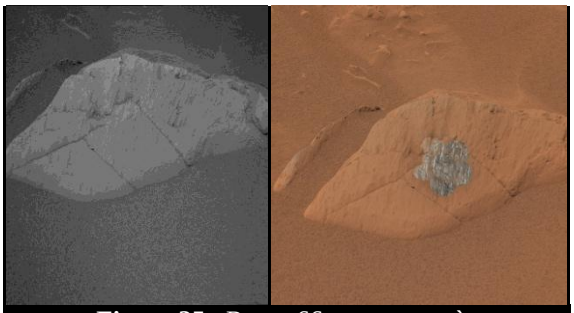


Figure 25 : Route 66 avant et après (Crédit : NASA/JPL/Cornell)

Au Sol 93 (7 avril), l'astromobile rejoint la roche dénommée « Route 66 » (Figure 25), puis il se positionne aussitôt pour prendre un nouveau cliché panoramique du paysage martien qui se trouve dans les environs (Figure 26). À chaque extrémité de la figure 26 nous pouvons voire la crête sud-ouest du cratère « Bonneville », « Route 66 » se trouve en bas à gauche, et sur la ligne d'horizon en se dirigeant de gauche vers la droite, nous retrouvons les « Columbia Hills » et le pic de « Grissom Hill ». Le rover Spirit va rester à proximité de « Route 66 » durant une semaine entière jusqu'au Sol 100, le temps de télécharger et de tester les nouvelles mises à jour de ses logiciels de navigation entre les Sols 94 et 98. C'est une étape très importante pour la suite du déroulement de la mission du rover sur Mars, et elle consiste à réinitialiser et à redémarrer le système informatique de bord de Spirit. Les nouvelles mises à jour des logiciels de bord du système de navigation ont pour but d'augmenter la capacité d'autonomie des rovers sur le terrain.

Trois améliorations majeures ont été apportées aux différents logiciels de navigation des rovers. En premier lieu, il y a les programmes d'imagerie virtuelle en relief 3D de la vision été

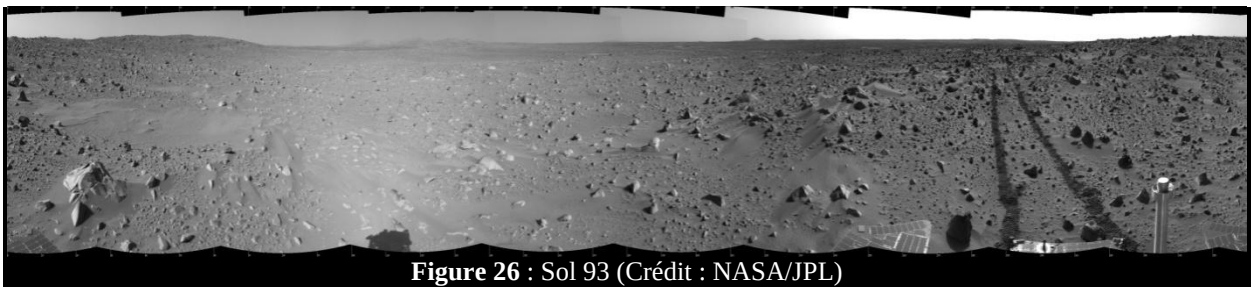


Figure 26 : Sol 93 (Crédit : NASA/JPL)

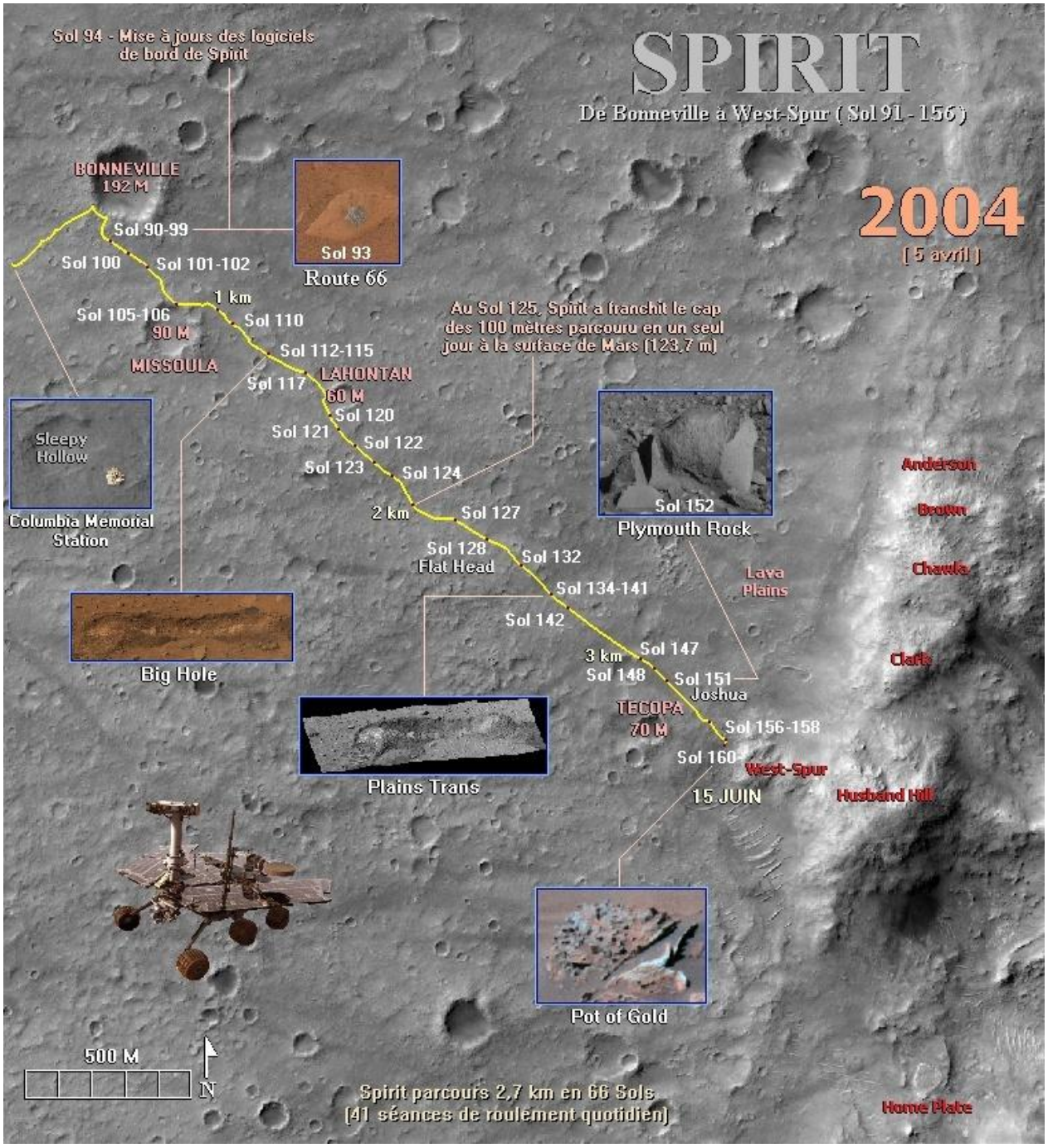


Planche 6 : Carte du trajet de Spirit entre les Sols 91 et 156. La photo d'arrière-plan a été obtenue grâce aux données fournies par la caméra Hirise de Mars Reconnaissance Orbiter (MRO) le 21 septembre 2008. Position et trajet des rovers guidés par les cartes de la Nasa et d'Eduardo Tesheiner.

stéréoscopique du système de navigation automatique de Spirit et d'Opportunity qui sont renforcé, dans le but d'améliorer la planification d'itinéraire sur de plus longues distances avec une capacité accrue pour l'évitement et le contournement de petits obstacles. Grâce à ses modifications Spirit a presque doublé sa vitesse de pointe sur le terrain, et il peut désormais parcourir des distances plus grandes en mode automatique à la surface de Mars. La deuxième modification consistait à fournir une meilleure gestion de la mémoire flash pour le rover Spirit,

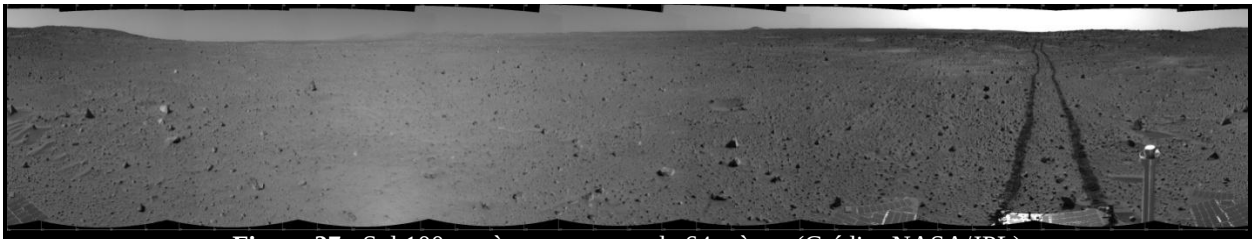


Figure 27 : Sol 100, après un parcours de 64 mètres (Crédit : NASA/JPL)

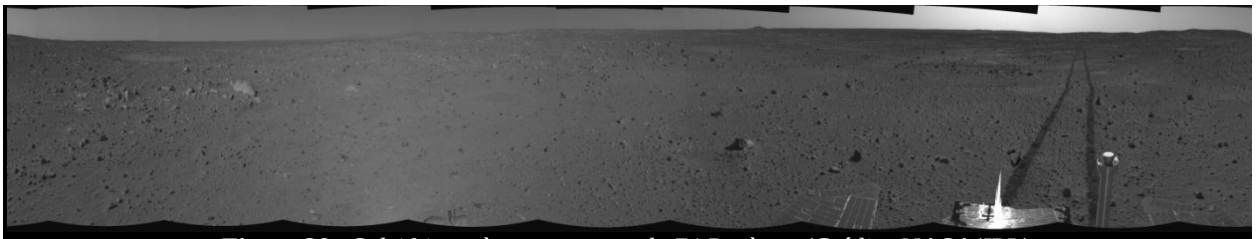


Figure 28 : Sol 101, après un parcours de 74,5 mètres (Crédit : NASA/JPL)

avec l'ajout de nouvelle balise de sécurité qui avait pour objectif d'éviter de nouveaux problèmes informatiques, comme ceux rencontrés sur le Sol 18. Et pour Opportunity, il s'agissait de l'ajout d'un programme de contrôle de l'alimentation, afin d'éviter une trop grande perte d'énergie lors du chauffage de l'articulation du système de déploiement du bras robotique. La troisième amélioration apportée au système de navigation des rovers, consistait en l'ajout d'un mode de sommeil profond (Deep Sleep), qui avait pour objectif de préserver l'énergie des batteries pendant les longues nuits froides martiennes. Au Sol 97, les procédures de téléchargements sont terminées et le système informatique de Spirit est réinitialisé, puis le système redémarre sans rencontrer de problème dès le lendemain.

Le 13 avril au Sol 99, Spirit est de nouveau en pleine forme et complète son étude de la roche « Route 66 » en brossant avec son outil d'abrasion RAT une mosaïque ayant la forme d'une marguerite composée de six tâches (Figure 25), que le rover analysera par la suite avec ses différents instruments scientifiques. Le robot en profite également pour prendre des spectres thermiques avec son spectromètre Mini-TES de deux petites roches situées tout près, soit « Back Lot » et « Cameo ». L'astromobile tourne définitivement le dos à « Route 66 » au Sol 100 pour reprendre sa route vers le sud-est en direction des « Columbia Hills » en roulant sur une distance de 64 mètres. Un tiers du trajet a été accompli en mode automatique assisté uniquement de ses nouveaux logiciels de navigation, avec en prime une vitesse de pointe de plus de 32 m/h, soit une vitesse qui est presque le double qu'avant les mises à jour. À la fin de la journée, Spirit en profite pour prendre un nouveau cliché panoramique de la plaine désertique environnante (Figure 27). La partie droite des Figures 26 à 30 correspond à la région arrière d'où est arrivé le rover, le centre des images correspond à la région avant qui donne sur les « Columbia Hills » vers lesquelles se dirige le robot à grande vitesse. Et dans la partie gauche des images, qui vient en fait rejoindre l'extrémité droite des clichés dans une projection cylindrique, on peut voir les bords du cratère « Bonneville » qui s'éloigne peu à peu à l'horizon. On peut également voir sur les différentes images, le pic de « Grissom Hill » à droite des « Columbia Hills » qui se trouve à plus de 7,5 km de distance. La distance parcourue sur les différentes images panoramiques est calculée en fonction du nombre de séances de conduite quotidienne d'avec le cliché panoramique précédent.

Spirit atteint la crête nord du cratère « Missoula » de 90 mètres de diamètre sur près de 18

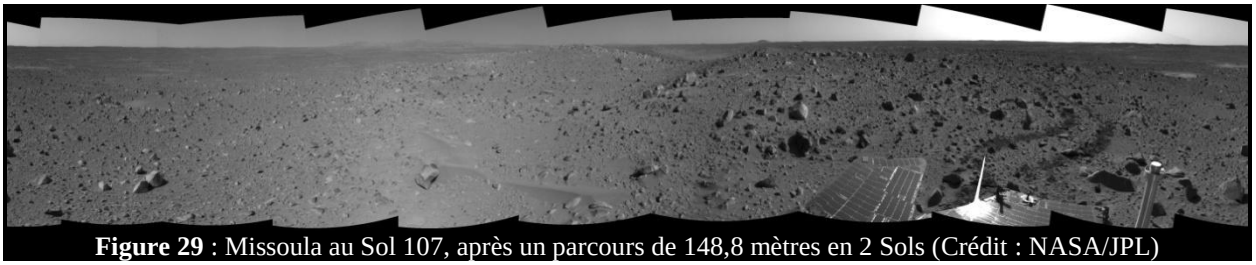


Figure 29 : Missoula au Sol 107, après un parcours de 148,8 mètres en 2 Sols (Crédit : NASA/JPL)

Figure 30 : Waffle Flats au Sol 110, après un parcours de 157 mètres en 3 Sols (Crédit : NASA/JPL)

Figure 31 : Sol 112, près d'un petit cratère après un parcours de 120,8 mètres en 2 Sols (Crédit : NASA/JPL)

Figure 31 b : Big Hole (NASA/JPL/Cornell/Jim Bell)

mètres de profondeur le 20 avril au Sol 105, et prend ensuite un cliché panoramique des environs du cratère entre les Sols 105 et 106 (Figure 29). Au centre de la Figure 29, on peut voir à l'horizon situé juste à gauche sous « Grissom Hill », les bords du cratère « Missoula » qui se trouve alors à droite du rover. Et juste un peu plus loin vers la gauche, on peut apercevoir les « Columbia Hills ». Sur le Sol 108, Spirit franchit son premier kilomètre parcouru à la surface de la planète Mars et prend un cliché panoramique du site « Waffle Flats » au Sol 110 (Figure 30). L'astromobile qui se déplace quotidiennement sur de grande distance, prend un nouveau panorama au Sol 112 (Figure 31) qui montre le terrain accidenté que doit traverser le petit robot près d'un petit cratère de 4,3 mètres de diamètre. Le 29 avril sur le Sol 113, Spirit utilise à nouveau ses roues pour creuser une nouvelle tranchée baptisée « Big Hole » (Figure 31:b) de six centimètres de profondeur, qu'il analysera jusqu'au matin du 1er mai, soit entre les Sols 113 et 116. Par la suite, l'astromobile s'est remis à rouler à vive allure vers les « Columbia Hills » à travers une plaine basaltique criblée de cratères. Depuis le Sol 100, Spirit a parcouru une distance de 504,4 mètres en 16 Sols à la surface de Mars (avec 9 séances de conduite quotidienne), soit une distance cumulée qui est un peu plus grande que lors des 87 premiers Sols de la mission, où l'astromobile avait franchi une distance de 500 mètres.

Spirit parcourt une distance de 563,1 mètres en une semaine entre le 3 et le 10 mai (Sols 118-125). Durant son trajet, le rover en profite également pour prendre plusieurs clichés

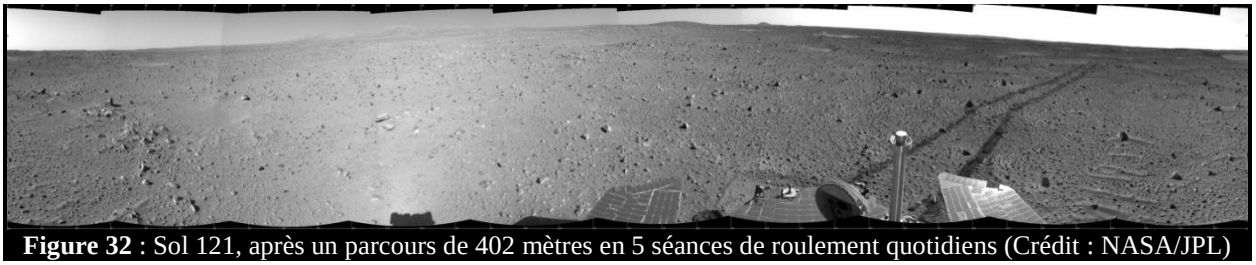


Figure 32 : Sol 121, après un parcours de 402 mètres en 5 séances de roulement quotidiens (Crédit : NASA/JPL)

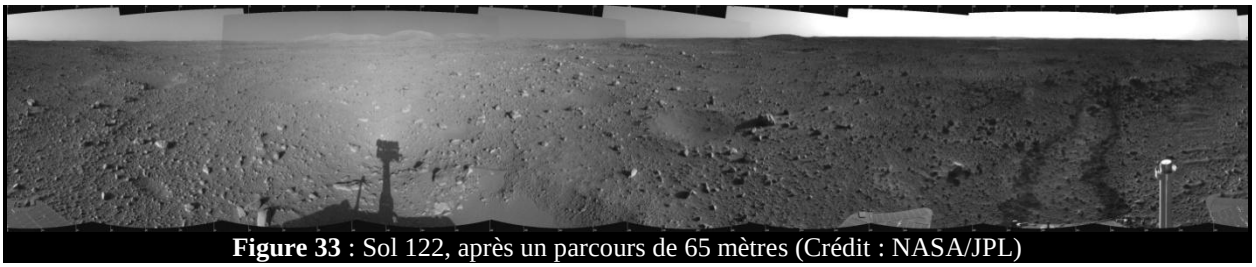


Figure 33 : Sol 122, après un parcours de 65 mètres (Crédit : NASA/JPL)

Figure 34 : Sol 123, après un parcours de 95,2 mètres (Crédit : NASA/JPL)

Figure 35 : Sol 124, après un parcours de 80 mètres (Crédit : NASA/JPL)

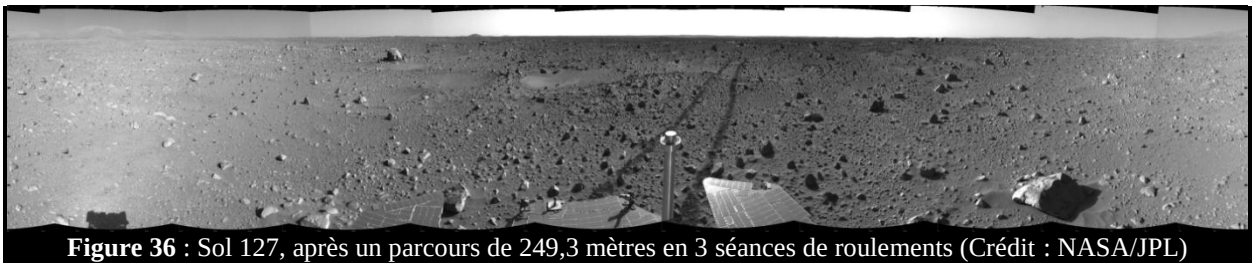


Figure 36 : Sol 127, après un parcours de 249,3 mètres en 3 séances de roulements (Crédit : NASA/JPL)

panoramiques du paysage martien qu'il rencontre sur sa route avec ses caméras de navigation, et chaque image est espacée de quatre-vingts mètres en moyenne (Figure 32 à 35). Sur le Sol 118, Spirit arrive à la hauteur du cratère « Lahontan » de 60 mètres de diamètre sur près de dix mètres de profondeur, que le robot contourne par le sud-ouest en longeant une petite dune de sable d'une vingtaine de mètres de long. Sur les différents clichés panoramiques que prend le rover sur sa route, on peut constater l'avance de Spirit vers les « Columbia Hills » qui se trouvent au centre gauche sur les différents clichés. Le cadre droit des images donne sur la vue arrière du rover

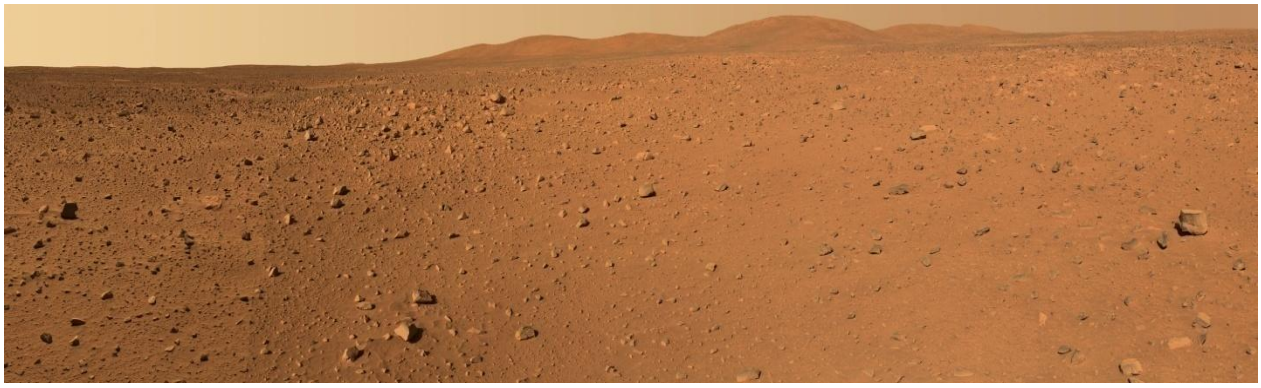


Planche 7 : Panorama Santa Anita pris entre les Sols 135 et 142 (Crédit : NASA/JPL/Cornell)

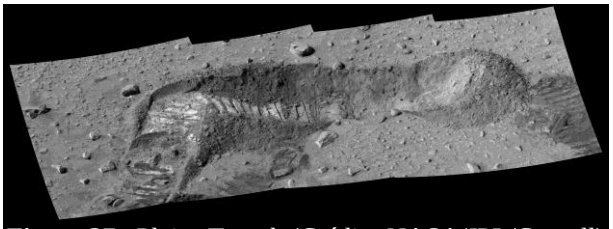


Figure 37 : Plains Tranch (Crédit : NASA/JPL/Cornell)

pointant vers le nord-ouest, et le cadre gauche des images donne sur la vue avant qui est orientée vers le sud-est. Le rover a franchi une distance de 96,8 mètres au Sol 121, dont la moitié a été effectuée en mode de navigation autonome, 65 mètres au Sol 122, 95,2 mètres au Sol 123 avec la moitié en mode de navigation autonome et de 80 mètres sur le Sol 124. Sur le Sol 125 (10 mai), l'astromobile franchit pour la première fois le cap des 100 mètres parcourus en une seule journée sur le sol martien, avec une distance de 123,7 mètres. Cette distance de conduite journalière sera la plus longue effectuée par le robot. Le rover dépasse du même coup son deuxième kilomètre parcouru à la surface de la planète Mars depuis le début de sa mission.

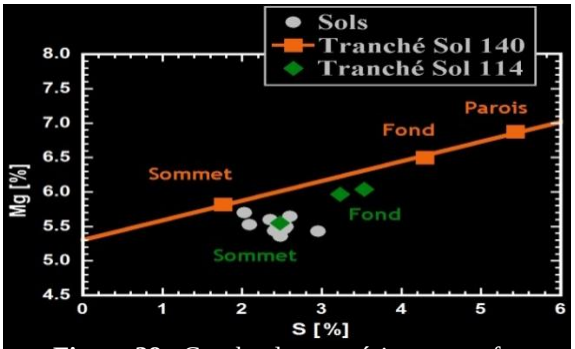


Figure 38 : Courbe de magnésium et soufre (Crédit : NASA/JPL/Cornell/Max Planck Institut)

Spirit effectue une nouvelle randonnée à vive allure dans les plaines de « Gusev », et franchit une distance d'environ 390 mètres en une semaine entre les Sols 127 et 134. Durant ce temps, le rover a fait une petite pause sur le Sol 127 pour prendre le cliché panoramique de la figure 36, et une autre le lendemain sur le Sol 128 dans le but de faire l'étude de la roche « Flat Head » (tête plate). Le robot franchit pour la deuxième et troisième fois (qui sera la dernière) le cap de cent mètres en une seule journée au Sol 133 et 134, avec un parcours de 113,1 et de 109,5 mètres. Le 20 mai au Sol 135, Spirit creuse sa troisième tranchée sur le sol martien qui a été baptisé « Plains Tranch » (Figure 37), et s'arrête pour une semaine entre les Sols 135 et 142 le temps de faire une série d'analyses complètes de la tranchée. Durant cette pause, le rover en profite pour prendre le magnifique panorama couleur « Santa Anita » de 360°, composé d'une mosaïque de 384 images prises à l'aide de six filtres de couleurs différents (Planche 7). Il s'agit du quatrième panorama de la mission qui couvre réellement un angle de 360°. Le lendemain sur le Sol 136, un petit problème de communication retarde l'analyse de la tranchée, qui ne reprendra que quatre jours plus tard sur le Sol 140 pour se terminer au Sol 142. Les ingénieurs de la Nasa vont profiter de cette pause pour diagnostiquer ce qui ne va pas, et pour réinitialiser le système informatique de bord du rover.

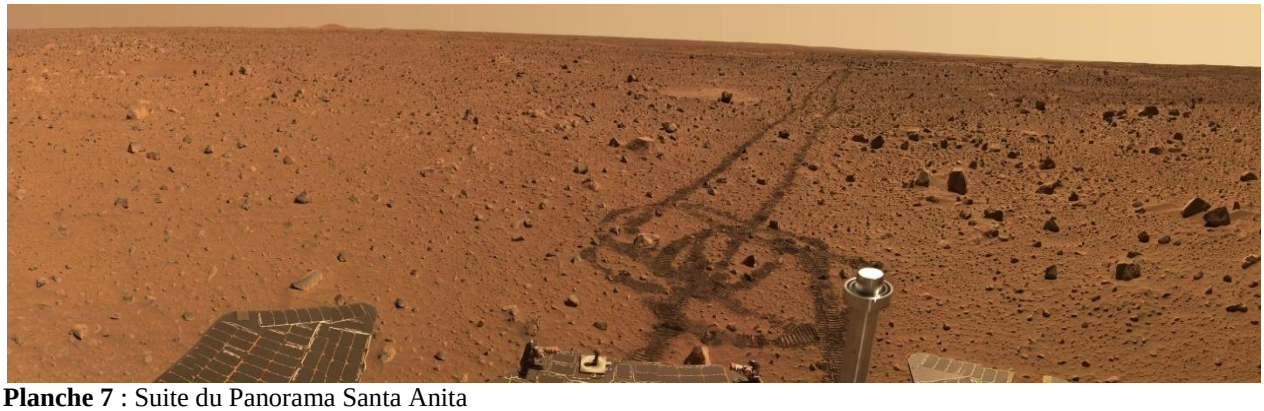


Planche 7 : Suite du Panorama Santa Anita

Les analyses effectuées par le spectromètre APXS de Spirit sur des échantillons provenant de cibles situées sur le sol martien, et sur des échantillons pris à différents endroits à l'intérieur des tranchées. Comme par exemples des échantillons analysés au sommet et au fond de la tranchée creusée au Sol 114 le 28 avril, et des échantillons analysés au sommet, sur le plancher situé au fond et sur les parois de la tranchée creusé sur le Sol 140 (25 mai). Ont dévoilées une forte présence de magnésium et de soufre qui croît de façon linéaire avec la profondeur. Le graphique de la figure 38 montre cette relation de croissance linéaire, entre la variation de la concentration de ces minéraux contenus dans les différents échantillons analysés par le rover sur le sol du cratère « Gusev ». Cette relation semble vouloir indiquer que le magnésium et le soufre sont présents sous forme de sel de sulfate de magnésium ($MgSO_4$).

Les sels de sulfate de magnésium ($MgSO_4$) sur Mars sont probablement formés par l'action corrosive de l'acide sulfurique (H_2SO_4), qui est contenu dans les gaz émis lors d'éruptions volcaniques. L'acide sulfurique en suspension dans l'atmosphère martienne peut aussi se former à partir de réactions photochimiques de décomposition moléculaire, qui implique le rayonnement ultraviolet solaire sur des molécules d'eau, du sulfure d'hydrogène (H_2S) et du dioxyde de soufre (SO_2). Par la suite, des réactions chimiques de recomposition moléculaire interviennent pour former différentes molécules, dont l'acide sulfurique (H_2SO_4) qui finit par se déposer sur le sol martien, en altérant les poussières et les roches volcaniques qui se trouvent à la surface de la planète pour donner des sulfates. Les dépôts de sel de sulfate de magnésium sont des matériaux de type évaporitique, qui se forment en milieu aqueux en voie d'assèchement. La présence de dépôts de sulfate à la surface de la planète semble vouloir indiquer que le sol martien a subi, dans un passé très lointain, différents épisodes d'infiltration d'une faible quantité d'eau qui a humidifié et dissout les sels contenus dans le sol. Ce phénomène aurait favorisé avec le temps, la formation des dépôts avec le départ de l'eau par évaporation et par sublimation. Laissant derrière les sels de sulfates de magnésium précipiter et s'accumuler en plus forte concentration, avant d'être ensevelis et recouverts par une fine couche de poussières poussées par les vents martiens, que le rover a dégagé par la suite avec ses roues en creusant les tranchées.

À partir du Sol 142, et après avoir pris un cliché panoramique en noir et blanc du paysage martien qui se trouve dans les environs (Figure 39). L'astromobile reprend sa course folle vers les « Columbia Hills », et parcourt une distance de 154,4 mètres en 3 Sols. Il ne reste plus que 500 mètres à parcourir avant d'atteindre le petit monticule de « West-Spur » qui se trouve à la base de « Husband Hill ». Spirit poursuit sa route entre les Sols 145 et 147, ou le robot parcourt une distance de 211 mètres supplémentaires en trois séances de conduite avant de franchir son

Figure 39 : Sol 142, après un parcours de 383,5 mètres en 8 séances de roulements (Crédit : NASA/JPL)

Figure 40 : Sol 147, après un parcours de 304,4 mètres en 5 séances de roulements (Crédit : NASA/JPL)

Figure 41 : Sol 148, après un parcours de 64,7 mètres (Crédit : NASA/JPL)

Figure 42 : Les Columbia Hills au Sol 148-49 (Crédit : NASA/JPL-Caltech/Cornell/D. Savransky et Jim Bell)

Figure 43 : Sol 151, après un parcours de 73 mètres (Crédit : NASA/JPL)

Figure 44 : West-Spur au Sol 156, après un parcours de 267 mètres en 5 Sols (Crédit : NASA/JPL)

troisième kilomètre parcouru à la surface de la planète Mars. La séance de conduite effectuée au Sol 145 inclut une séquence de roulement programmée de 43 mètres, suivie par une séquence de conduite assistée du logiciel de navigation autonome d'une durée de deux heures pour franchir une distance de 55 mètres supplémentaire. Le rover profite de l'occasion au Sol 147 pour immortaliser cet exploit en prenant un cliché panoramique qui dévoile toute la beauté du paysage martien de cette région (Figure 40). Sur le Sol 148, Spirit prend le temps de faire deux nouveaux clichés, soit un cliché panoramique du paysage martien pris par la caméra de navigation (Figure 41), et un magnifique zoom en couleur du versant ouest des « Columbia Hills » pris par la caméra panoramique (Figure 42). Dans la partie droite de la Figure 42, on peut apercevoir au premier plan le petit monticule de « West-Spur » qui est situé juste devant « Husband Hill ». « Husband Hill » est le plus haut sommet des « Columbia Hills » avec une hauteur de 80 mètres. L'astromobile reprend la route au Sol 151 (Figure 43) après avoir effectué une courte analyse de la roche « Josuha » au Sol précédent, et il utilise la roche « Playmouth Rock » au Sol suivant pour calibrer ses données de navigations. En deux Sols, soit entre les Sols 151 et 152, l'astromobile a parcouru une distance de 156 mètres à la surface de la planète Mars et arrive finalement à la hauteur du cratère « Tecopa » de 70 mètres de diamètre.

Spirit franchit les derniers 184 mètres entre les Sols 153 et 156, où il arrive enfin au pied de « West-Spur » (Figure 44) le 11 juin 2004. Depuis son départ du cratère « Bonneville », et durant toute la traversée de la plaine basaltique jusqu'à « West-Spur », Spirit a pris plusieurs clichés panoramiques qui montrent sa lente progression sur le terrain. Par la suite, le rover va effectuer un court déplacement de quatre mètres vers le sud-ouest de « West-Spur » au Sol 159, afin de se positionner au plus près d'une petite roche baptisée « End-of-Rainbow » qui se trouve à l'intérieur d'une petite dépression qui a été baptisée « Hank Moore Hollow », où Spirit se gare pour les 23 Sols suivants. Après avoir effectué un parcours de 3,5 kilomètres dans le cratère « Gusev » en l'espace d'un peu plus de 5 mois, soit une espérance de vie qui est presque le double de celle qui avait été initialement prévue, et d'une distance parcourue à la surface de la planète Mars qui est six fois plus grandes que celle qui avait été initialement garantie par les concepteurs du robot. Le rover Spirit a démontré sa robustesse et son extraordinaire longévité, et est finalement prêt pour accomplir la prochaine étape de sa mission géologique sur Mars qui est de gravir les pentes de « Husband Hill » jusqu'à son sommet.

DE WEST-SPUR AU SOMMET
(Sol 156 à 634)

Après avoir quitté le cratère « Bonneville » depuis deux mois et demi, et parcouru plus de 2,7 kilomètres à travers une plaine basaltique et désertique (3,4 km depuis le site d'atterrissage), Spirit arrive finalement sain et sauf au pied des « Columbia Hills » au Sol 156 (11 juin). L'astromobile va rester stationnée durant les trois semaines suivantes dans la petite dépression dénommée « Hank's Hollow », qui est située tout juste au pied de l'éperon « West-Spur » entre les Sols 159 et 181 du 14 juin au 7 juillet. Le rover va profiter de cette longue pause pour analyser plus en détail la roche « Pot of Gold » (Pot d'Or) à partir du Sol 161 (Figure 46:b) en raison de sa couverture de nodules, ainsi que plusieurs autres cibles qui se trouvent sur le sol à proximité durant les Sols suivants. Spirit prend un magnifique cliché de l'horizon sud-ouest donnant sur les plaines intérieures du cratère « Gusev » au Sol 161 (Figure 45), qui dévoile au loin sur l'horizon les contreforts du cratère qui ont une hauteur moyenne de 1,6 km et qui se trouvent à plus de 80 kilomètres de distance.

Figure 45 : L'horizon sud-ouest au pied de West-Spur

Figure 46 : Bright Tracks

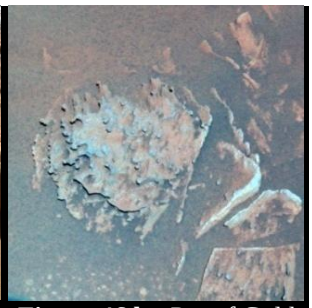


Figure 46 b : Pot of Gold

(Crédit : NASA/JPL/Cornell)

Spirit est toujours à la recherche d'indices minéralogiques de la présence prolongée de l'eau, qui aurait jadis coulé en abondance à la surface de la planète Mars. Le rover recherche plus particulièrement des sédiments de types évaporites résultant de la précipitation de sels en milieu aqueux, ou des roches sédimentaires formées par l'action érosive de l'eau. Les analyses de « Pot of Gold » effectuées entre les Sols 161 et 172 par le spectromètre Mössbauer, avec le brossage de la roche au Sol 169, ont révélé pour la première fois dans le cratère « Gusev » la présence de petites sphérules d'hématites (Fe_2O_3), ayant une forme un peu différente des myrtilles qui avaient été observées de l'autre côté de la planète par l'astromobile Opportunity. L'hématite est un minéral stable d'oxyde de fer qui peut se former en présence d'eau froide faiblement acide, ou en présence d'oxydant comme le peroxyde d'hydrogène (H_2O_2). Au Sol 165 (20 juin 2004), Spirit prend un cliché de ses traces sur le sol baptisé « Bright Tracks » (Figure 46), et découvre à l'intérieur une étrange formation brillante de couleur blanchâtre. S'agit-il d'un sel évaporite qui se serait formé en présence d'eau dans le passé, et que les roues du rover auraient dégagé par la suite ?

Planche 8 : Trajet de Spirit entre les Sols 156 et 634. La photo d'arrière-plan a été obtenue grâce aux données fournies par la caméra Hirise de Mars Reconnaissance Orbiter (MRO) en décembre 2006. Position et trajet des rovers guidés par les cartes de la Nasa et de Eduardo Tesheiner.

L'étude de « Hank's Hollow » se poursuit au début du mois de juillet avec les cibles sur le sol de « Breadbox » et de « Sourdough » au Sol 175, et de « String of Pearls » (collier de perles) au Sol 177. Le 5 juillet sur Sol 180, le rover accomplit une nouvelle grande étape dans sa mission ; il est maintenant rendu au double de la durée de vie qui avait été initialement prévue à la surface de la planète Mars. Mais le temps est venu pour le robot de subir une nouvelle révision de ses différents systèmes de bord, avant d'entreprendre l'ascension du sommet de « Husband

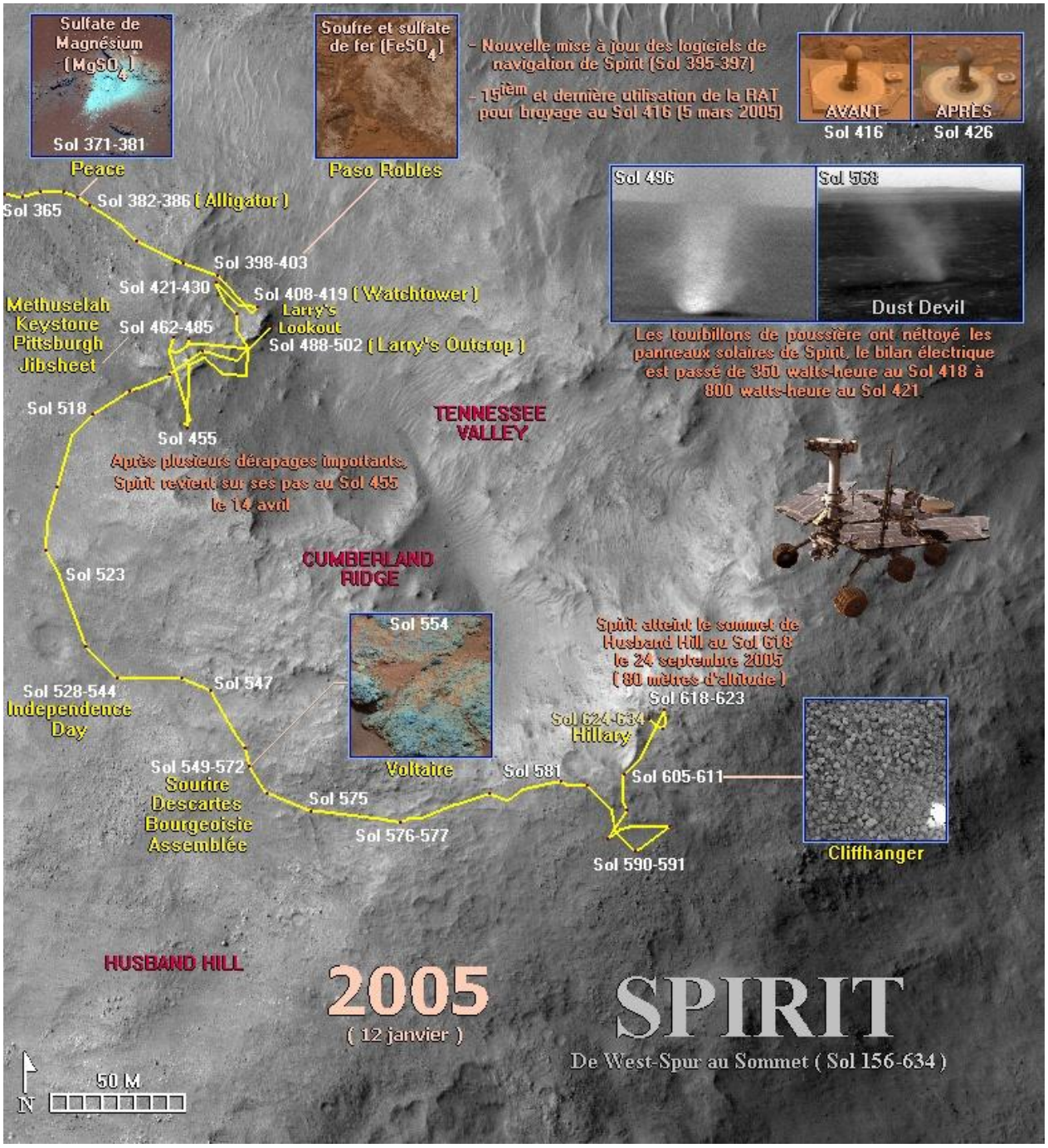


Planche 8 : Suite du trajet de Spirit entre les Sols 156 et 634.

Hill ». Pour ce faire, Spirit rejoint un site de stationnement et de remisage qui a été baptisé « Engineering Flats », pour y subir une série d'épreuves et de tests qui vont durer quelques jours entre les Sols 182 et 186. Le rover en profite également sur le Sol 182 (7 juillet) pour prendre avec ses caméras de navigation le cinquième véritable panorama de 360° de la mission (Figure 47). On peut voir le site de remisage dans la partie gauche de l'image, et dans la partie droite on peut apercevoir les traces du robot lors de son arrivée au pied de « West Spur » sur le Sol 156.

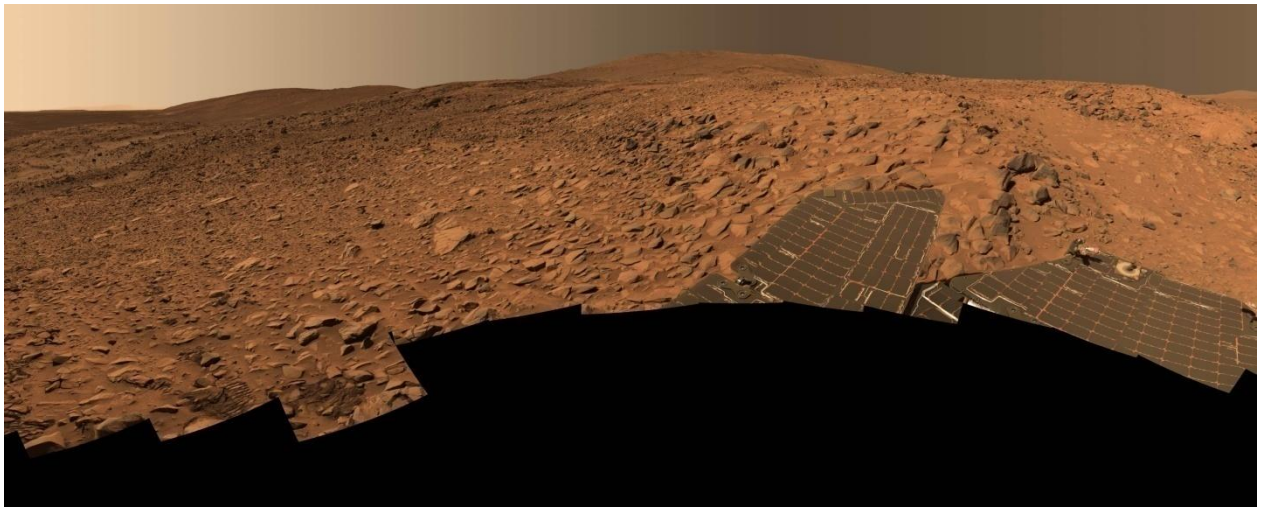


Planche 9 : Panorama Cahokia à la hauteur de Clovis (Crédit : NASA/JPL/Cornell)

Spirit éprouve cependant quelques petits problèmes, et souffre de plus en plus d'une baisse de puissance électrique qui survient lors de la recharge de ses batteries. Cette perte de puissance de 20 % est surtout causée par l'accumulation progressive des poussières qui se déposent sur les panneaux solaires du rover, mais aussi par le manque d'ensoleillement causé par l'arrivée de l'hiver martien dans deux mois (en septembre 2004), avec un soleil qui est de plus en plus bas sur l'horizon. Les ingénieurs de la NASA vont également profiter de cette pause pour vérifier le problème du manque de puissance de la roue avant droite, qui consomme deux fois plus d'énergie que les autres roues du rover et qui avait été rencontré pour la première fois sur le Sol 126. Le sommeil profond sera également testé pour faire économiser de la puissance électrique à l'approche des longues nuits froides de l'hiver martien. Entre les Sols 184 et 186, Spirit teste le chauffage du moteur de sa roue avant droite par le soleil, dans le but de faciliter la circulation du lubrifiant dans sa roue défectueuse. Le rover subit ensuite un calibrage de ses caméras de navigation avant, afin de corriger une légère dérive d'évitement d'obstacle qui survient lors du déploiement du bras robotisé au moment de positionner les instruments scientifiques près de leur cible. Les tests de chauffage par le soleil pour faciliter la circulation du lubrifiant dans la roue défectueuse n'a pas permis de régler le problème de la roue avant droite du rover. Après un petit test de roulement en marche arrière de quatre mètres, la décision fut prise au Sol 188 de faire désormais progresser le robot en marche arrière avec cinq de ses roues motrices. La roue défectueuse sera désormais utilisée seulement pour franchir des obstacles plus difficiles, et ceci afin d'éviter un vieillissement trop prématuré du moteur électrique de la roue.

Figure 47 : Engineering Flats au Sol 182 (Crédit : NASA/JPL)

Au Sol 189 (15 juillet), Spirit prend un nouveau cliché panoramique de « West-Spur » (Figure 48) que le robot contourne par le versant nord-ouest, et poursuit sa route vers un

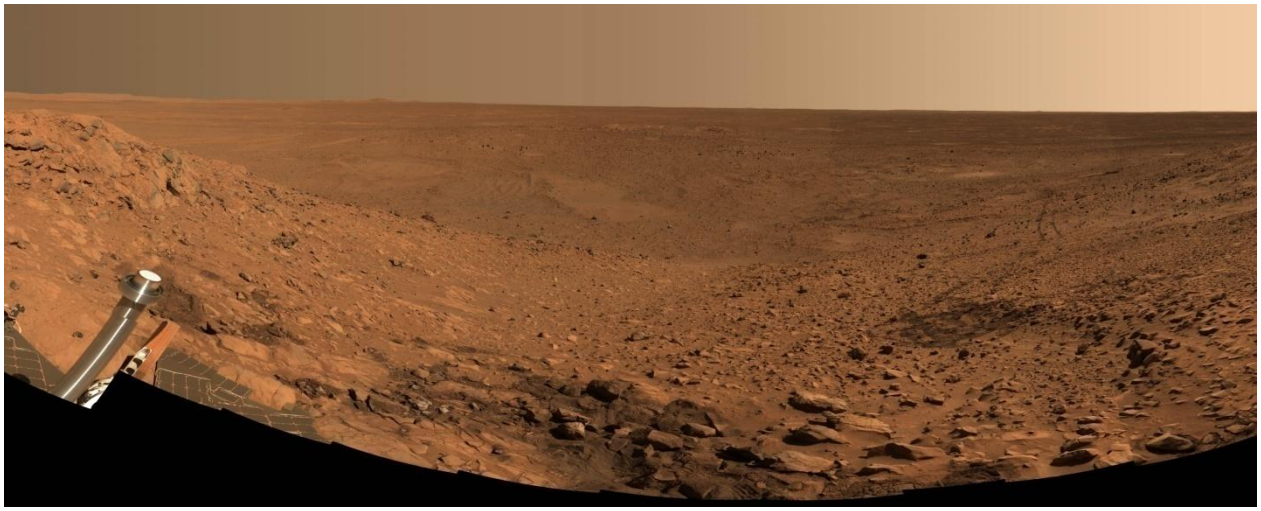


Planche 9 : Suite du Panorama Cahokia

affleurement rocheux (outcrop) dénommé « Wooly-Patch » que le rover atteindra au Sol 192. Les figures 47 et 48 montrent le lent déplacement du robot Spirit qui s'éloigne doucement du site « Engineering Flats ». Les deux clichés ont été pris à une trentaine de mètres d'intervalle parcourus en cinq petites séances de roulement effectuées sur des Sols différents. L'astromobile creuse sur les cibles de roche « Sabre » (Sol 195) et « Mastodon » (Sol 198) qui se trouvent sur « Wooly-Patch » (Figure 49), et entame par la suite une série d'analyses avec tous ses instruments scientifiques entre les Sols 194 et 200. Le rover reprend la route sur une pente qui est de plus en plus abrupte et qui dépasse par endroits les 25° d'inclinaison, puis le robot se dirige vers un autre affleurement rocheux dénommé « Clovis ».

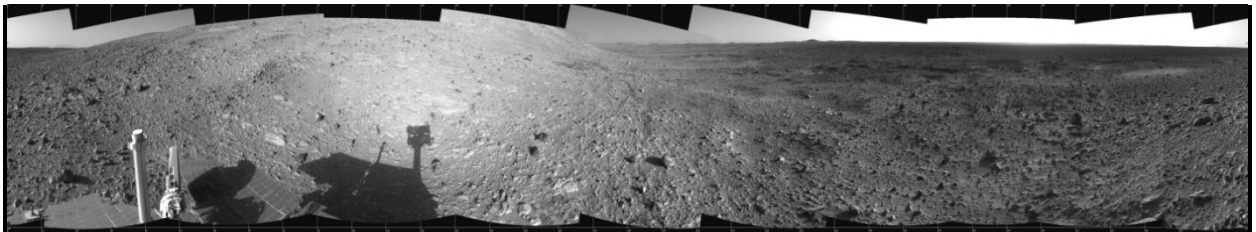


Figure 48 : Panorama du Sol 189, après un parcours de 36 mètres en 5 séances de roulement (Crédit : NASA/JPL)

Pour optimiser l'efficacité des panneaux solaires lors de la recharge des batteries. Spirit doit suivre une trajectoire qui est orientée le plus possible vers le nord, afin de donner au robot une légère inclinaison en direction du soleil qui est de plus en plus bas sur l'horizon à mesure que s'approche l'hiver martien. Spirit éprouve cependant une certaine difficulté à gravir la pente en direction de « Clovis ». Le robot patine dans le sable fin à plusieurs reprises, et le 1er août au Sol 206, il glisse et perd plus de terrain qu'il en gagne. L'astromobile atteint « Clovis » seulement au Sol 210 (Figure 52) après avoir pris une pause d'une journée pour recharger ses batteries, et le temps que le centre de contrôle lui transmette un nouveau plan de route plus sécuritaire. Au même moment, Spirit transmet pour la première fois ses données par l'intermédiaire de la sonde Mars Express de l'agence spatiale européenne (ESA) au Sol 208, afin de tester le relais de transmission vers la Terre qui sera utilisé plus tard par la sonde Phoenix en mai 2008. Le rover est maintenant situé à plus de neuf mètres d'altitude au-dessus des plaines environnantes de « Gusev ». Entre les Sols 213 et 223 (du 9 au 19 août), Spirit perché sur Clovis prend le

Figure 49 : Wooly-Patch **Figure 50 :** Clovis **Figure 51 :** Ebenezer
(Crédit : NASA/JPL/Cornell)

magnifique panorama couleur « Cahokia » (Planche 9) composé d'une mosaïque de 470 images acquises à travers six filtres de couleurs différentes de la PanCam, que Spirit finira de transmettre à la Terre deux semaines plus tard au Sol 237 (2 septembre). Il s'agit du tout premier panorama couleur de 360° effectué depuis que l'astromobile est arrivée au pied de « West Spur ». La tache de terre sombre en bas à droite de la moitié droite de l'image de droite du panorama de la planche 9, est l'endroit où Spirit s'est arrêté pour effectué des travaux d'ingénierie sur sa roue avant droite dont la résistance et le blocage fait patiné, dévier et glisser le rover. Et un peu plus haut au loin en contre bas décalé un peut sur la gauche on peut voir « Hank's Hollow », et encore plus loin vers le centre de l'image le cratère « Tecopa », et au centre de l'image de gauche on peut apercevoir le sommet de « Husband Hill ». Le rover brosse « Clovis » au Sol 214 et après avoir étudié la surface nettoyée, le robot creuse plus profondément (RAT Grind) dans la roche durant 2,5 heures sur la cible « Plano » au Sol 216 atteignant une profondeur record de 8,9 mm, la séance d'analyse incluait également une longue séance d'intégration de 48 heures par le spectromètre Mössbauer au Sol 218. Spirit utilise une dernière fois de son outil d'abrasion (RAT Brush) sur « Clovis » au Sol 225, pour brosser un motif composé de sept taches en forme de fleur baptisé « Kiva » que le rover analysera par la suite avec ses différents instruments scientifiques (Figure 50). Les différentes analyses de « Clovis » ont démontrée une altération par l'eau plus approfondie et plus profonde, et que cette roche contient la plus forte concentration en soufre, en brome et en chlore, que toutes les autres analyses de roches ou de cibles sur le sol rencontrées jusqu'ici dans le cratère « Gusev ». Avec en prime de la première détection de goethite (FeO(OH)).

Figure 52 : Panorama pris à la hauteur de Clovis et de Longhorn au Sol 210 (Crédit : NASA/JPL/Cornell)

La forte teneur en soufre contenue dans la fine couche de poussière qui recouvre le sol et la surface des roches, peut s'expliquer par des épisodes passés d'éruptions volcaniques (voir l'introduction), qui auraient de manière successive éjectés une grande quantité de soufre sous forme de sulfure d'hydrogène (H_2S) et de dioxyde de soufre (SO_2), mélangé avec du gaz carbonique (CO_2) et un peu de vapeur d'eau. Ces gaz se transformeraient par la suite en acide sulfurique (H_2SO_4) dans l'atmosphère martienne à l'aide des rayons UV solaires. Les gaz en suspension auraient formé un léger brouillard acide qui aurait fini par se déposer en fine couche

sur le sol tout en lui transférant des propriétés chimiques un peu plus acides. Cette faible acidité aurait favorisé l'altération des structures minérales des roches et des poussières en facilitant leur agglomération par exemple, et la création des sulfates (SO_4) par l'action corrosive de l'eau avant qu'elle ne s'évapore par sublimation. Dans ce type de scénario, si on remplace l'acide sulfurique par un superoxyde comme le peroxyde d'hydrogène (H_2O_2), on peut également expliquer l'altération prononcée de l'affleurement rocheux « Clovis », comme semble le suggérer la détection du 13 décembre 2004 de la goethite (FeO(OH)), d'hématite (Fe_2O_3) et de silicate (SiO_4) lors de différentes analyses effectuées par le spectromètre Mössbauer (Figure 53). La goethite est un minéral de fer hydraté qui contient des radicaux hydroxyles (OH) dans sa structure chimique ; ce qui indique que ce minéral se forme uniquement en présence d'eau, soit sous forme liquide, solide ou gazeuse.

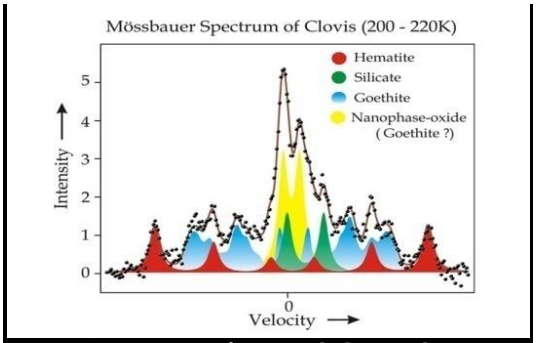


Figure 53 : Détection de la Goethite (Crédit : NASA/JPL/ University of Mainz)

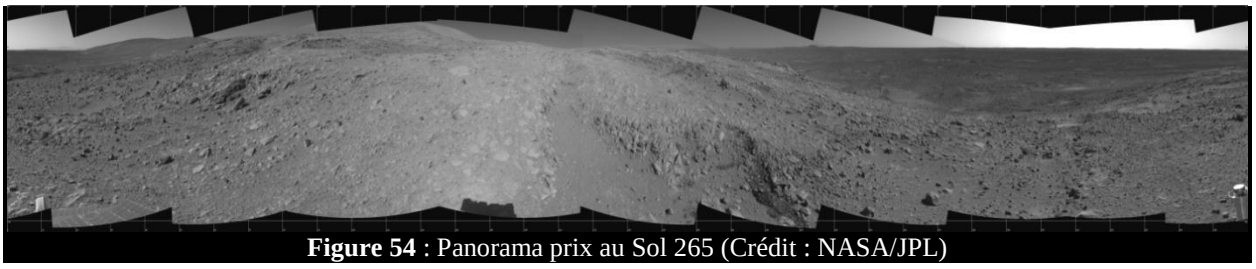


Figure 54 : Panorama prix au Sol 265 (Crédit : NASA/JPL)

Spirit se déplace de huit mètres vers l'est au Sol 226 pour aller rejoindre la roche « Ebenezer » (Figure 51), qu'il analyse par la suite en détail aux Sols suivants (226-238). Le rover brosse la roche « Ebenezer » au Sol 230 pour dégager une surface assez grande et assez propre pour faire une analyse de nuit avec son spectromètre à rayons X et particules alpha (APXS). Le lendemain le 27 septembre, l'astromobile entame une longue séquence de broyage de deux heures sur la cible « Cratchit 2 », en creusant un trou assez profond à offrir comme échantillon d'analyse au spectromètre Mössbauer pour une très longue intégration de deux Sols. Une mosaïque de huit zones adjacentes en forme de fleur sera également brossée sur la roche entre les Sols 236 et 238. La composition chimique de la roche « Ebenezer » s'est révélée être comparable à celle de « Clovis », il s'agit de roche basaltique d'origine volcanique lointaine qui ont fourni les premières preuves directes d'une altération aqueuse poussée, étant différente de celle des autres roches de type basaltique qui ont été rencontrées jusqu'ici. Le robot Spirit reprend sa route au Sol 238 le 3 septembre en direction du nouveau site baptisé « Tikal », mot qui signifie « Pierre » en langue Maya, et qui se trouve neuf mètres plus loin vers l'est. Le rover en profite également pour se préparer à l'arrivée du solstice d'hiver martien au Sol 254 (20 septembre), où l'insolation et les températures seront à leurs minima. L'alimentation électrique passant de 900 watts/heure par jour en été à seulement 400 watts/heure par jour en hiver. Cette baisse d'énergie de plus de 55 % affecte grandement la durée et le nombre d'activités quotidiennes que peut effectuer le robot à la surface de Mars. Spirit se prépare également à survivre au silence radio d'une durée d'une dizaine de jours qui surviendra lors de la conjonction solaire du 10 septembre 2004, quand la planète Mars passera derrière le soleil par rapport à la terre entre les Sols 244 et 256 du 10 au 22 septembre 2004.

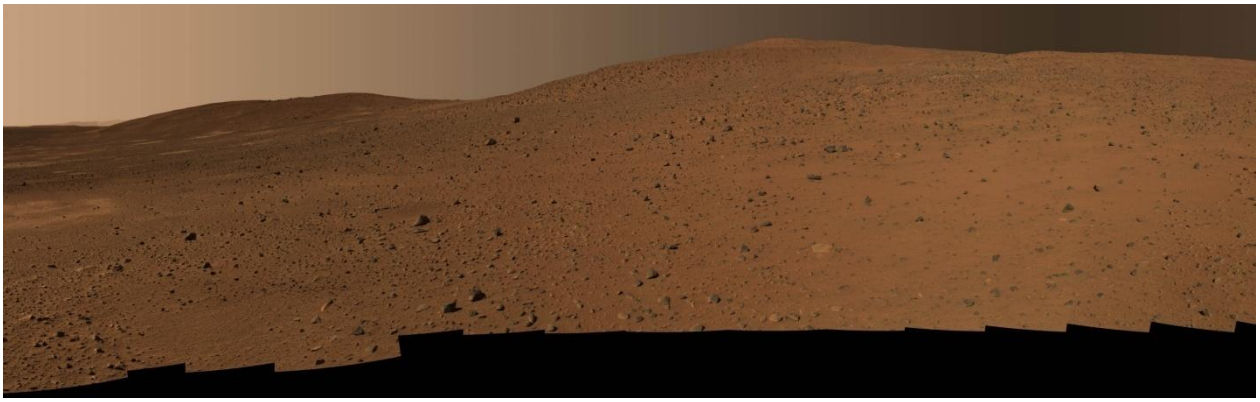


Planche 10 : Panorama Thanksgiving (Crédit : NASA/JPL/Cornell/Bob Deen et Jim Bell)

Les communications radio reprennent sur le Sol 256 (22 septembre), et Spirit est toujours en excellente santé stationné près de « Tikal ». Durant la conjonction solaire, le rover a effectué une douzaine d'opérations en mode automatique qui ont été programmées d'avance : recueillir des données météo, analyser les poussières collectées sur les aimants du rover avec le spectromètre Mössbauer, et photographier de futurs sites potentiels. Sur le Sol 265 le 1er octobre, le rover prend le panorama de la figure 54, puis il se remet en route vers l'affleurement rocheux « Tetl » qu'il rejoint au Sol 271 et que l'astromobile étudiera durant une semaine entière entre les Sols 271 et 278. L'affleurement « Tetl » (Figure 55) ressemble beaucoup à une roche sédimentaire stratifiée en forme de feuillet, dont la sédimentation de chaque feuillet aurait eu lieu à des époques différentes. Spirit reprend la route en direction du nord-est au Sol 279, puis s'arrête un peu le temps de faire l'étude d'une parcelle de sol dénommée « Take a Break », avant de franchir les six mètres qui séparent « Tetl » d'un autre affleurement rocheux baptisée « Uchben » (Figure 56), qui signifie « ancien » en langue maya et que le rover atteindra au Sol 281. Les roches « Tetl » et « Uchben » sont des roches sédimentaires composées de cendres volcaniques, qui semblent avoir été altérées par l'eau à plusieurs reprises lors de leur formation. Spirit brosse à deux reprises « Uchben », afin de l'étudier une première fois sur la cible « Koolik » au Sol 285, puis une seconde fois sur la cible « Chiikbes » au Sol 290. L'astromobile parcours ensuite deux autres mètres en direction ouest au Sol 296, et rencontre la roche « Lutefisk » (Figure 57) qu'il étudie durant une semaine jusqu'au Sol 303, incluant un brossage dans la partie inférieur de la roche au Sol 298 suivit d'un deuxième brossage dans la partie supérieur au Sol 299.

Figure 55 : Tetl **Figure 56** : Uchben **Figure 57** : Lutefisk **Figure 57 b** : Lutefisk après
(Crédit : NASA/JPL/Cornell)

Le rover Spirit poursuit l'ascension des pentes de « Husband Hill » au Sol 304, en se déplaçant vers le site de « Machu Picchu ». L'astromobile vise désormais un petit promontoire rocheux dénommé « Larry's Lookout » qui le surplombe au nord-est à plus de 75 mètres de

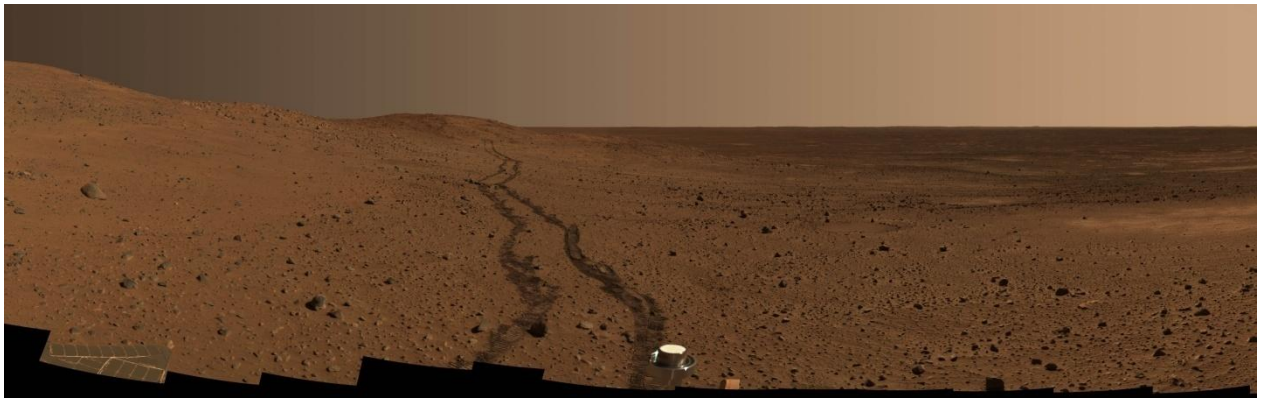


Planche 10 : Suite du Panorama Thanksgiving

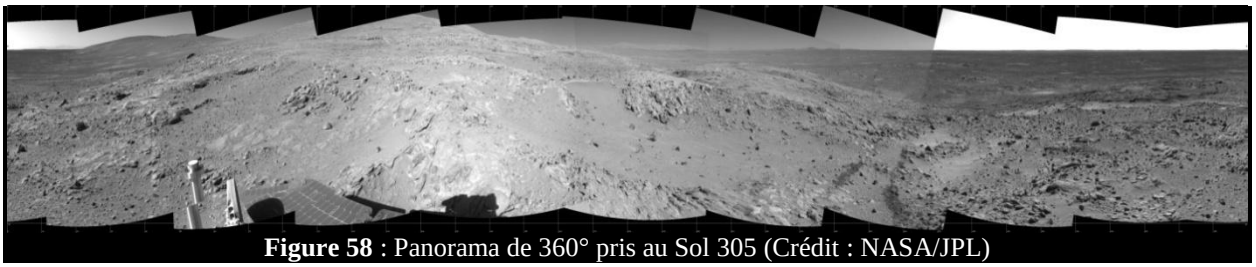


Figure 58 : Panorama de 360° pris au Sol 305 (Crédit : NASA/JPL)

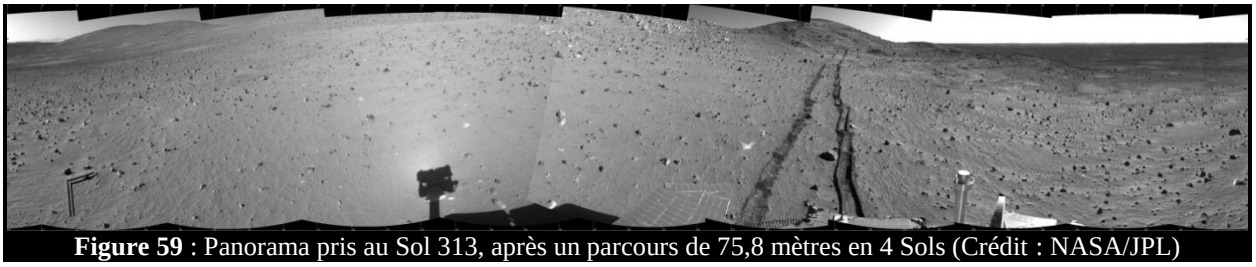


Figure 59 : Panorama pris au Sol 313, après un parcours de 75,8 mètres en 4 Sols (Crédit : NASA/JPL)

Figure 60 : Wishstone (Crédit : NASA/JPL/Cornell)

Figure 61 : La roche coincée (Crédit : NASA/JPL)

distance. La route conduisant à « Larry's Lookout » sera très difficile pour le petit robot. Il aura à affronter une pente qui est de plus en plus abrupte inclinée de plus de 20 degrés par endroit, et ceci sans parler des roches et du sable fin très sablonneux qu'il rencontrera sur sa route. Spirit parcourt 250 mètres en 40 Sols, dont les derniers 110 mètres sont franchis sur une étendue plate en six Sols seulement. Durant cette randonnée, le rover fait plusieurs études de terrain et prend plusieurs clichés panoramiques du paysage martien qu'il rencontre sur sa route. Les clichés des figures 58, 59 et 62, montrent la lente progression du robot le long du versant nord de « West-Spur ». Vers la fin de cette petite randonnée entre les Sols 318 et 325, Spirit prend le magnifique panorama couleur « Thanksgiving » de 360°, composé d'une mosaïque de 243 images prises à l'aide de trois filtres de couleurs différentes de la PanCam (Planche 10). Dans la partie gauche de l'image de droite de la Planche 10, on peut voir la fin du site de « Machu Picchu ».

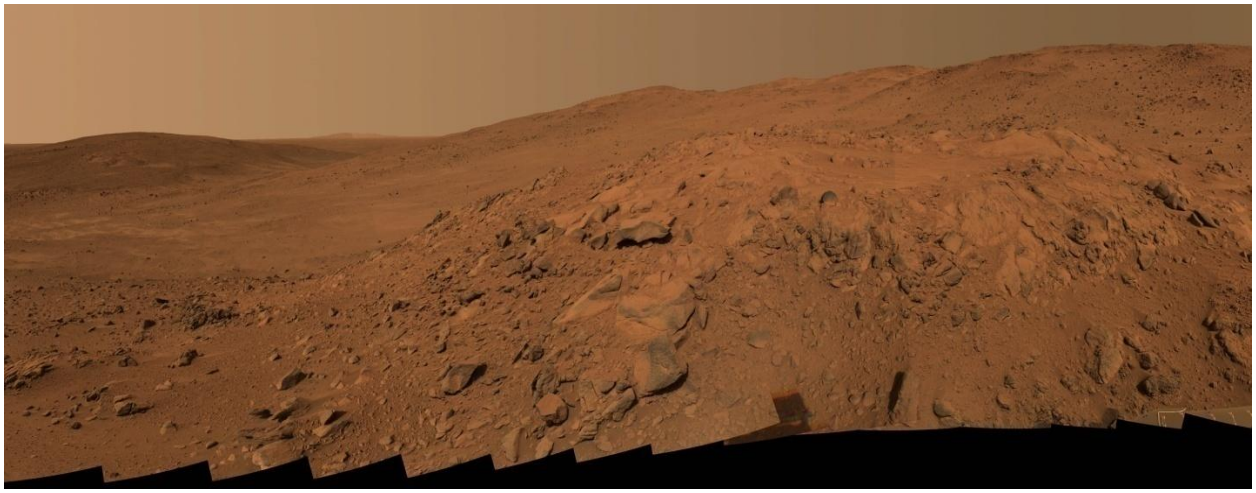


Planche 11: Panorama Lookout (Crédit : NASA/JPL/Cornell/Bob Deen et Jim Bell)

Au Sol 333, Spirit s'arrête quelque temps près de la roche « Wishstone » (pierre à souhait) riche en phosphore, pour en faire une étude plus détaillée jusqu'au Sol 337 (Figure 60 et dans la partie supérieure gauche de la Figure 62 juste au-dessus des traces de roues du robot). La roche aura droit à une séance d'abrasion sur la cible « Chisel » au Sol 334. Le rover éprouve de la difficulté en voulant s'éloigner de « Wishstone » entre les Sols 338 et 339. L'astromobile subit des dérapages importants de plus de 80 % sur une pente sablonneuse qui est inclinée de 15 à 20 degrés par endroit. Un gros caillou de la grosseur d'une pomme de terre est venu se coincer dans la roue arrière droite du rover au Sol 339 (Figure 61), et qui a fait caler son moteur électrique. La roche restera coincée durant six jours avant d'être définitivement dégagée au Sol 345, après que Spirit ait testé plusieurs manœuvres de roulement sur le sol pour la dégager. L'astromobile s'élance de nouveau vers « Larry's Lookout » qui est situé un peu plus haut sur la crête de « Cumberland Ridge », et il parcourt seize mètres avec beaucoup de difficulté en 15 Sols avant de rencontrer sur sa route la roche « Champagne » que le rover analysera entre les Sols 352 et 359, soit du 29 décembre 2004 au 6 janvier 2005. L'analyse de la cible « Bubbles » qui a été brossée (Sol 354) puis broyée sur la roche « Champagne » au Sol 355, a dévoilé encore une fois la présence de phosphore. Le rover Spirit fête son premier anniversaire sur Mars au Sol 357 le 4 janvier 2005, et il franchit une semaine plus tard sur le Sol 363 (11 janvier) le cap de son quatrième kilomètre parcouru à la surface de la planète rouge. L'opacité du ciel martien, le facteur Tau, a été plus grande que la moyenne à la mi-janvier, et ceci est essentiellement causé par l'augmentation des poussières en suspension dans l'atmosphère martienne, qui sont soulevées par des tempêtes de poussière locales à l'approche du printemps dans l'hémisphère sud de la planète. Ce qui oblige Spirit à prendre des temps de pause et d'exposition au soleil qui sont de plus en plus longs pour recharger ses deux batteries.

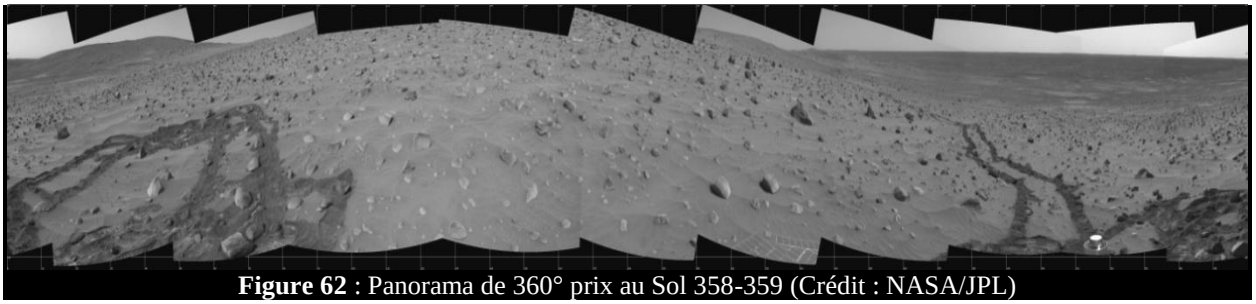


Figure 62 : Panorama de 360° prix au Sol 358-359 (Crédit : NASA/JPL)

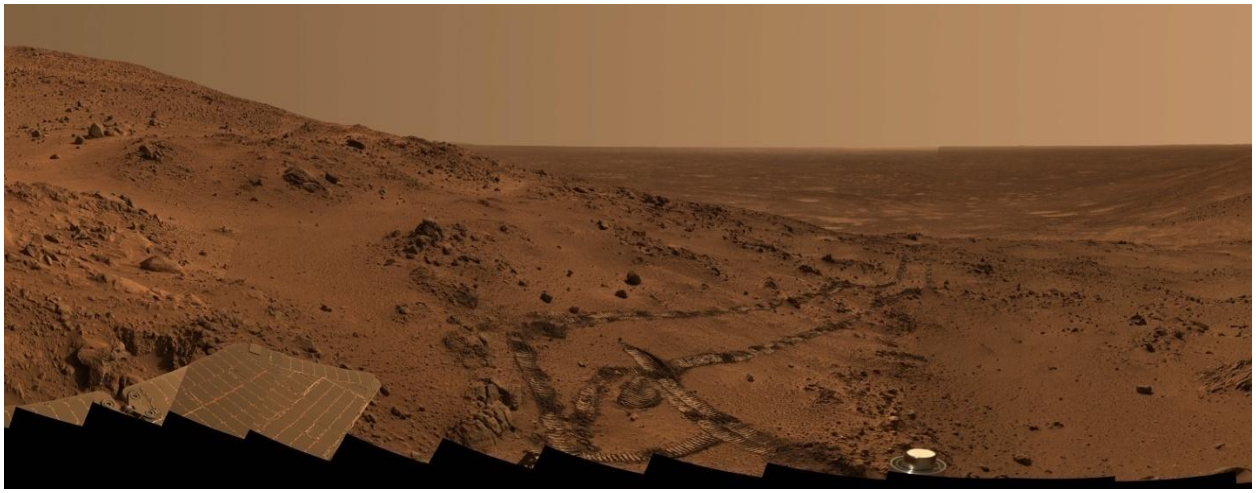


Planche 11 : Suite du Panorama Lookout.

Le rover tourne vers le sud-est, et poursuit son ascension du sommet de « Husband Hill » en longeant la crête « Cumberland Ridge » par le nord. L'astromobile atteint la roche « Peace » (Figure 63) le 18 janvier 2005 au Sol 371, et il entreprend aussitôt une batterie de tests et d'analyses qui vont durer plus de dix jours, soit jusqu'au Sol 381. Et contrairement aux autres analyses de roches qui avaient été effectuées jusqu'à maintenant, du sulfate de magnésium ($MgSO_4$) sous forme de sel a été détecté à l'intérieur de la roche et non en surface. Spirit brosse la surface de la roche au Sol 373 et effectue une première séance de broyage au Sol 374, puis établit un nouveau record lors de la deuxième séance de broyage sur le Sol 377 (24 janvier), en creusant un trou de 9,7 mm de profondeur sur la cible « Justice » se trouvant sur la roche « Peace ». Battant ainsi l'ancien record du mois d'août 2004 qui était de 8,9 mm, record établi lors du forage de la cible « Plano » sur l'affleurement rocheux« Clovis ». L'astromobile franchit 18,5 mètres supplémentaires aux Sols 381 et 383 pour rejoindre la roche dénommée « Alligator », où il entame une nouvelle séquence d'analyses très complètes de plusieurs jours entre les Sols 382 et 386, incluant un brossage au Sol 385 (Figure 64:a). Le moment est alors venu pour les ingénieurs de la NASA de faire une nouvelle mise à jour des différents logiciels de navigation du robot, dans le but de pouvoir optimiser l'ascension vers le sommet de « Husband Hill ». Mise à jour qui a débuté sur le Sol 395 le 13 février et qui va se compléter deux jours plus tard sur le Sol 397.

Figure 63 : Peace **Figure 64 :** Alligator et Paso Robles (Crédit : NASA/JPL/Cornell)

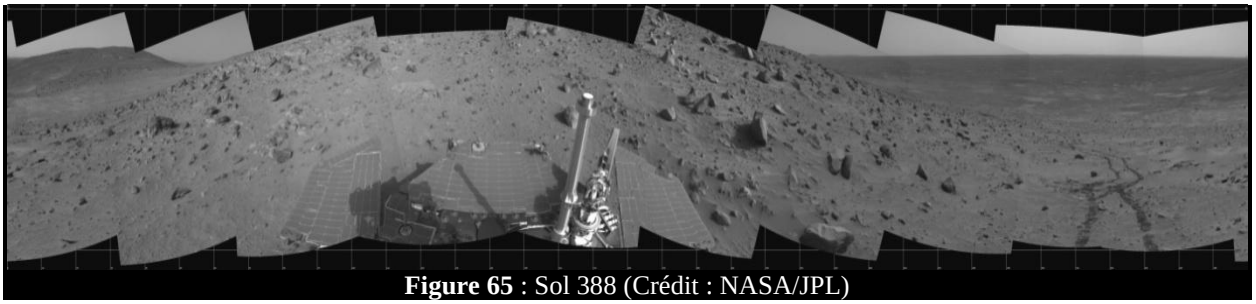


Figure 65 : Sol 388 (Crédit : NASA/JPL)

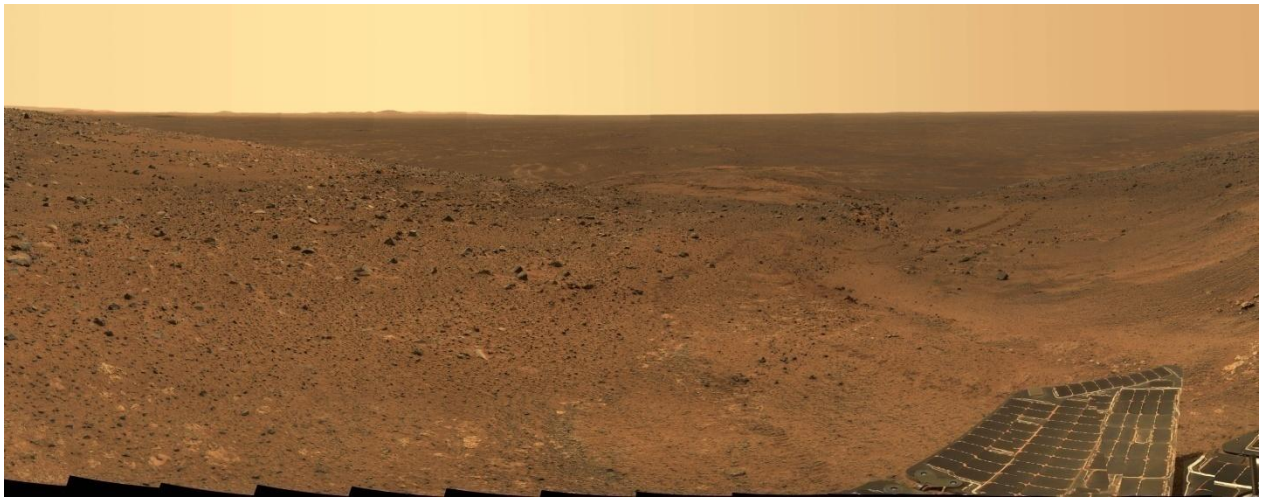


Planche 12 : Panorama Independence (Crédit : NASA/JPL/Cornell/Bob Deen et Jim Bell)

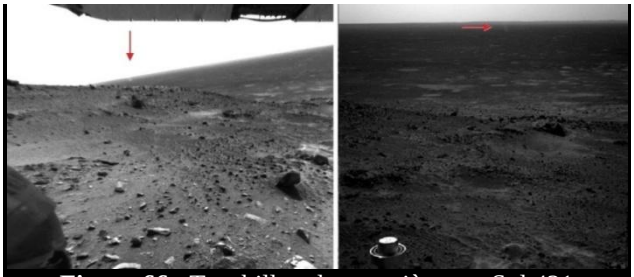


Figure 66 : Tourbillon de poussières au Sol 421 (Crédit : NASA/JPL-Caltech)

Le lendemain au Sol 398, le rover patine, glisse et dérape. Et après n'avoir franchi que 10 mètres avec difficulté en plusieurs jours sur un terrain sablonneux. Spirit s'arrête entre les Sols 399 et 403 afin d'analyser le dépôt de matière claire contenue dans les traces de 40 centimètres de large baptisées « Paso Robles » (Figure 64:b). Les analyses de la substance blanchâtre de « Paso Robles » ont révélé une forte concentration de soufre sous forme de sulfate de fer ($FeSO_4$). Depuis le Sol 388 (Figure 65), le rover a parcouru 72 mètres avant d'atteindre son point d'observation sur « Larry's Lookout » au Sol 407 le 24 février, et depuis son départ de la roche « Wishstone » au Sol 337, Spirit a parcouru une distance de 155 mètres en 70 jours (Sols) pour gravir les pentes de « Husband Hill » jusqu'à « Larry's Lookout ». Une vue imprenable s'offre désormais au rover qui est maintenant sur le versant nord-est de « Husband Hill », donnant en contrebas sur la vallée baptisée « Tennessee Valley ». Spirit en profite pour entamer le magnifique panorama couleur « Lookout » de 360° (Planche 11), composé d'une mosaïque de 108 images de la PanCam prises à l'aide de cinq filtres de couleurs différentes que le robot complétera 4 jours plus tard. À gauche de l'image on peut apercevoir « Tennessee Valley » suivit de « Larry's Lookout », et dans la partie droite de l'image de droite on peut voir« Paso Robes » qui est situé juste en avant des pistes du rover enforme de zigzag, et on peut constater l'accumulation de poussières sur les panneaux solaires de Spirit. Du Sol 414 jusqu'au Sol 419, Spirit se positionne devant la roche « Watchtower » (la tour de guet) pour l'étudier. La campagne d'analyse comprend une séance de brossage au Sol 415, suivi dès le lendemain d'une séance d'abrasion sur la cible « Joker ». Et à cause de l'usure des lames, le rover exécutera son 15^{ième} et dernier véritable broyage de la mission au Sol 416. L'outil d'abrasion RAT sera cependant utilisé à d'autres occasions au cours de la mission sur Mars, pour polir et brosser la surface des échantillons afin de les nettoyer avant leur analyse. Au Sol 421 le 10 mars 2005, les caméras arrière d'évitement d'obstacle (Rear Hazcam) de l'astromobile surprennent pour la première fois dans le cratère « Gusev », l'évolution de deux diables de poussière (Dust Devils) en pleine action (Figure 66) située à environ 1 100 mètres, et qui se déplaçait à une vitesse moyenne de 3

Planche 12 : Suite du Panorama Independence

m/sec (11 km/h).

À l'approche du printemps dans l'hémisphère Sud de la planète Mars, le soleil chauffe de plus en plus la surface qui devient plus chaude que l'air situé à deux mètres au-dessus du sol, où l'air reste plus frais. Ce petit contraste de température est suffisant pour provoquer une chute de pression à la hauteur du sol, qui engendre alors un mouvement de convection de l'air chaud vers haut et de l'air plus frais vers le bas, entraînant avec lui la poussière du sol dans un mouvement tourbillonnant. Ce petit coup de vent a été très bénéfique pour Spirit, car il a nettoyé les panneaux solaires du robot qui avaient perdu beaucoup de leur rendement, on peut même voir la différence sur les Planches 11 et 12. L'alimentation électrique du rover est passée de 350 watts/heure le 7 mars au Sol 418 à plus de 800 watts/heure au Sol 421, soit juste après le passage du tourbillon de poussière. Un tel rendement de l'alimentation électrique n'avait pas eu lieu depuis le Sol 80. Le rover Spirit aura l'occasion d'observer plusieurs autres petites tornades de poussières au cours de sa longue mission sur Mars.

Figure 67 : Les affleurements Methuselah, Jibsheet, Larry`s Outcrop et la roche Backstay (Crédit : NASA/JPL/Cornell)

Avec le plein d'énergie, Spirit repart dans la direction de « Paso Robes » entre les Sols 419 et 424 pour effectuer une nouvelle série d'analyses du site, et fait patiner ses roues une fois

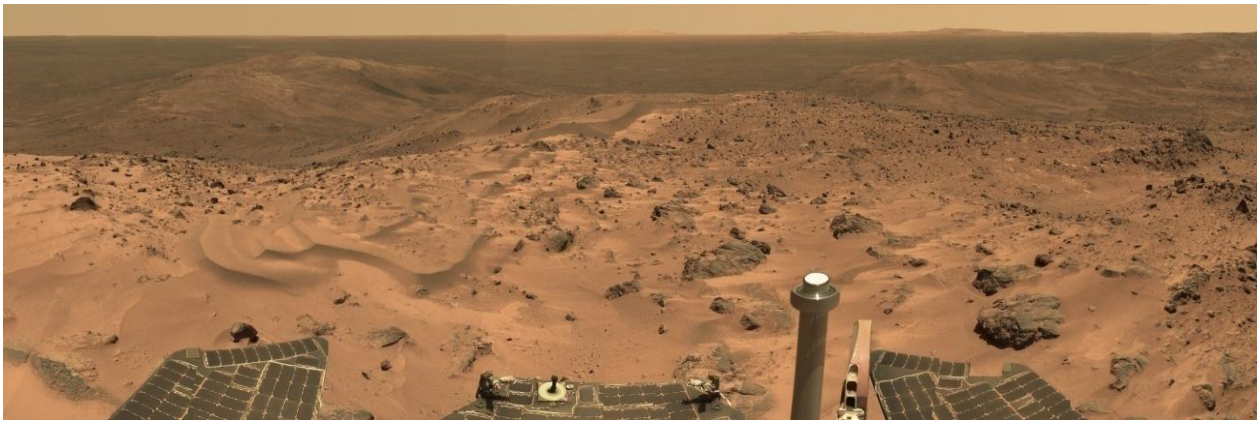


Planche 13 : Panorama Evrest (Crédit : NASA/JPL/Cornell/Bob Deen et Jim Bell)

de plus pour dégager plus du sol frais. L'analyse du sol montre encore une fois la présence de sulfate (SO_4), preuve que l'eau a déjà coulée en faible quantité par le passé dans le cratère « Gusev ». L'astromobile quitte « Paso Robes » au Sol 434, puis reprend son ascension vers le sommet de « Husband Hill ». Trois jours plus tard, soit le 23 mars 2005, le rover assiste à l'arrivée de son premier printemps dans l'hémisphère sud de la planète. Après avoir effectué plusieurs dérapages importants sur une pente raide et glissante, la décision fut prise le 14 avril au Sol 455 de faire revenir le rover en arrière, le temps pour les contrôleurs du robot à la NASA de trouver une route plus sûre avant de reprendre l'ascension vers le sommet de « Husband Hill ». L'astromobile se dirige ensuite vers l'affleurement rocheux dénommé « Methuselah » (Figure 67) qu'il atteint au Sol 462. Entre les Sols 467 et 473, le rover fait une étude approfondie des cibles « Abigail », « Priscilla » et « Keystone » (*Clef de voûte*) qui se trouvent sur l'affleurement rocheux, incluant une séance de brossage de « Keystone » au Sol 470. L'astromobile se déplace ensuite vers la roche « Pittsburgh » entre les Sols 474 et 476, qu'il brosse au Sol suivant. Puis le rover tourne vers la droite en direction de l'affleurement rocheux « Jibsheet », pour entamer l'étude des cibles « Reef » entre les Sols 481 et 483, et « Davis » entre les Sols 483 et 487, incluant une séance de brossage de la roche au Sol 484. Par la suite, le rover tourne de nouveau vers la droite et franchit une vingtaine de mètres en deux Sols en direction de « Larry's Lookout », afin d'aller rejoindre un autre affleurement rocheux baptisé « Larry's Outcrop » au Sol 488 (Figure 67 et 68). Spirit effectue ensuite des analyses sur les cibles « Paros » entre les Sols 491 et 493, de « Ahab » avec le brossage de sa surface au Sol 496, puis suivra « MobyDick » entre les Sols 499 et 503. Le 2 juin sur le Sol 503, le rover repart dans la direction de l'affleurement « Methuselah ». Mais avant de quitter définitivement « Larry's Lookout », Spirit entreprend le magnifique panorama couleur « Whale » de 220° entre les Sols 497 et 500 (Figure 68) composée d'une mosaïque de 50 images prises à l'aide de cinq filtres de couleurs différentes

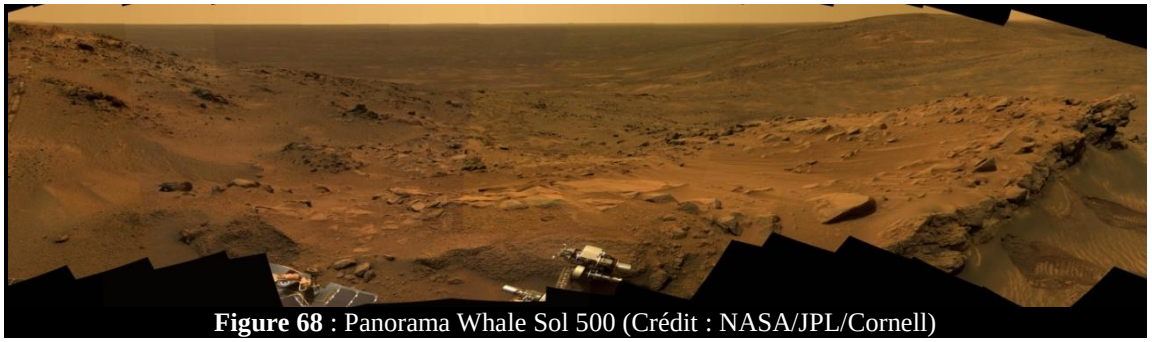


Figure 68 : Panorama Whale Sol 500 (Crédit : NASA/JPL/Cornell)

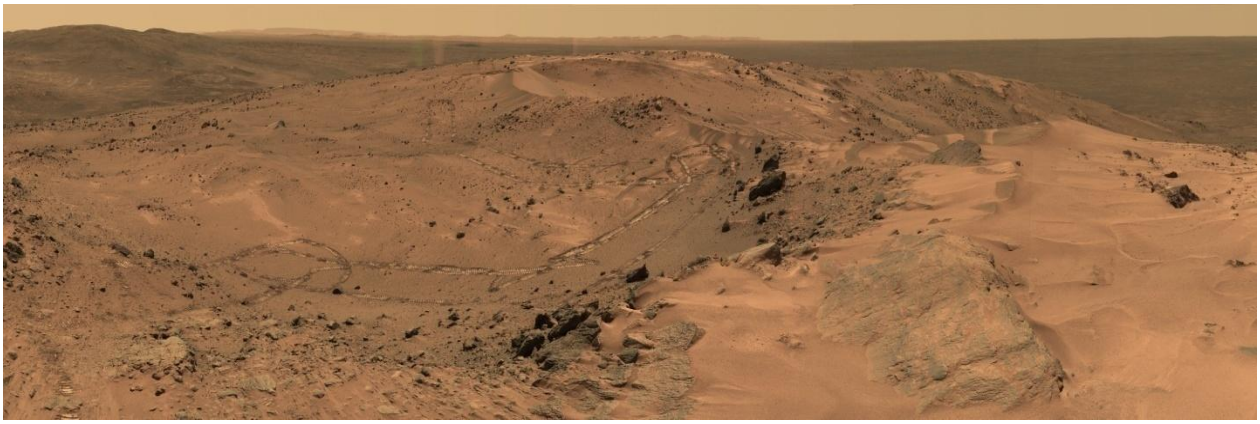


Planche 13 : Suite du Panorama Evrest

de la PanCam. À droite du panorama « Whale » on peut apercevoir l'affleurement rocheux « Larry's Outcrop », et vers le haut à l'extrême gauche de l'image on peut voir l'affleurement rocheux « Jibsheet ». L'objectif principal de la mission est dorénavant de trouver un chemin plus sûr pour gravir la pente vers le sommet de « Husband Hill », qui se trouve plus haut vers le sud à plus de 250 mètres de distance.

Figure 69 : Descartes et Voltaire
(Crédit : NASA/JPL-Caltech/Cornell)

Spirit rencontre la roche « Backstay » le 7 juin au Sol 507 que le robot étudié jusqu'au Sol 512 avec brossage au Sol 509, et l'affleurement rocheux « Methuselah » pour une deuxième fois entre les Sols 513 et 514. Par la suite, le rover va franchir une distance de 110 mètres vers le sommet en deux semaines et arrive près de la roche « Independence Day » le 4 juillet au Sol 528, nommée en hommage à la fête nationale américaine, et que le robot va brosser dès le lendemain (Sol 529). Spirit profite de l'occasion entre les Sols 536 à 543 pour prendre le magnifique panorama couleur de 360° qui a été baptisé pour l'occasion « Independence » (Planche 12), composé de 108 images prises à l'aide de cinq filtres de couleurs différentes de la PanCam. Sur le panorama « Independence », on peut apercevoir à droite de l'image le sommet de « Husband Hill » qui est situé à seulement 100 mètres plus loin, et à gauche on peut voir la crête « Cumberland Ridge » qui surplombe « Tennessee Valley ». Le rover reprend l'ascension de la pente vers le sommet au Sol 544, tout en

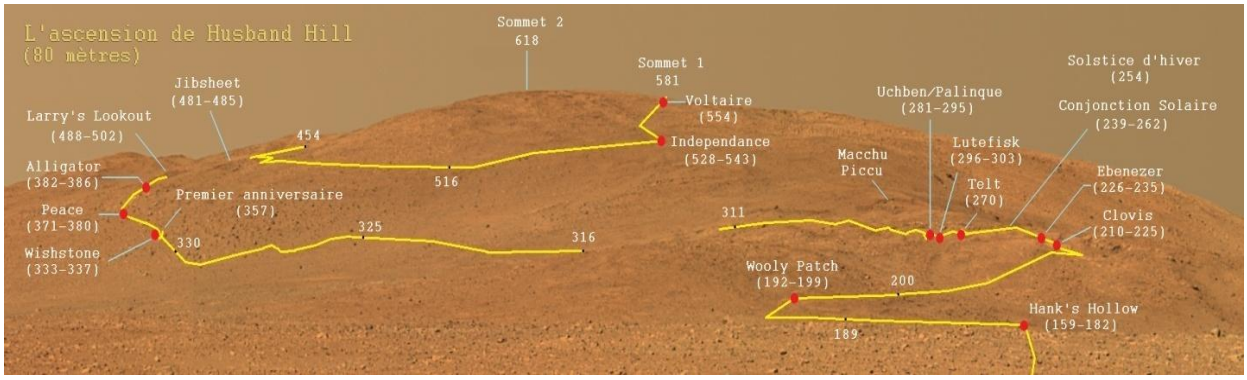


Planche 13s : L'ascension de Husband Hill entre les Sols 159 et 581

Figure 70 : Spirit au Sommet au Sol 581 (Crédit : NASA/JPL)

prenant le temps d'effectuer des analyses de roches durant sa route. Dont « Discourse » (Sols 552-556) qui sera brossé au Sol 553, « Descartes » (Sols 556-561), « Bourgeoisie » (Sols 557-562) qui sera brossé au Sol 560, « Voltaire » entre les Sols 562-565 (Figure 69), puis finalement la roche « Assemblee » située deux mètres plus loin et que Spirit va étudier durant une semaine entière entre les Sols 565 et 572 avec une séance de brossage au Sol 566. Plusieurs autres cibles seront également observées durant le trajet. L'alimentation électrique du rover est à son maximum à l'approche du solstice d'été, qui doit se produire sur le Sol 577 (16 août 2005), avec un rendement électrique de plus de 900 watts/heure par jour en moyenne. Les tempêtes de poussières y sont également pour quelque chose, car elles ont nettoyé régulièrement les panneaux solaires du rover depuis le Sol 421.

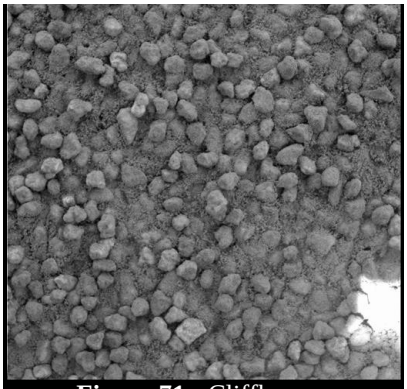


Figure 71 : Cliffhanger (NASA/JPL-Caltech/Cornell/USGS)

Spirit franchit une étape très importante de sa mission sur le Sol 581 (22 août), il arrive enfin à la hauteur du sommet de « Husband Hill » après avoir parcouru plus d'une centaine de mètres sur les neuf derniers Sols. Pour l'occasion le rover entreprend le montage d'un cliché panoramique du sommet (Figure 70) qui surprend trois tourbillons de poussière en pleine action dans les plaines du cratère « Gusev », évoluant entre 2 et 3 kilomètres de distance avec des diamètres de l'ordre de 90 mètres sur 275 mètres de haut et se déplaçant vers l'est-sud-est. L'astromobile se déplace ensuite de 20 mètres vers l'est sur un terrain plat les deux Sols suivants, afin de trouver un meilleur endroit pour prendre un nouveau cliché panoramique des environs à partir du sommet. Le rover reprend la route au Sol 589 et effectue différentes mesures sur l'affleurement « Irvine » au Sol 600, puis sur la cible de sol « Cliffhanger » entre les Sols 607 et 611 (Figure 71). Spirit atteint le point le plus élevé du sommet (le vrai sommet) au Sol 618 (24 septembre), et en profite pour prendre une pause bien méritée jusqu'au Sol 623. Durant ce temps, le rover prépare le panorama couleur « Evrest » de 360° (Planche 13) entre les Sols 620 et 622 (du 1er au 3 octobre 2005), composée d'une mosaïque de 81 images prises à l'aide de quatre

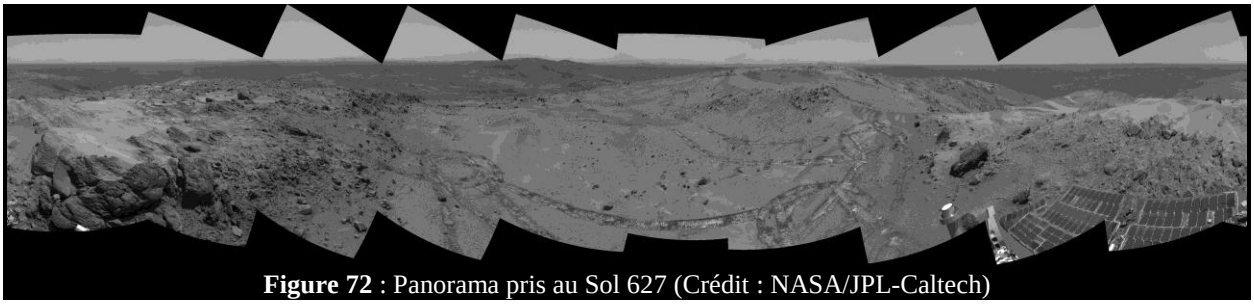


Figure 72 : Panorama pris au Sol 627 (Crédit : NASA/JPL-Caltech)

filtres de couleurs différentes de la PanCam. Ensuite le robot s'approche de l'affleurement rocheux « Hillary » (Figure 72 et 73) pour faire son étude entre les Sols 624 et 634. L'apparence et la composition minéralogique de l'affleurement « Hillary » sont semblables à celle de « Jibsheet » qui a été rencontrée plus tôt au Sol 481. Il s'agit de roche riche en plagioclase (un feldspath) composée de silicates amorphes non cristallins.

Figure 73 : L'affleurement rocheux Hillary
(Crédit : NASA/Cornell/JPL and M. Di Lorenzo et al.)

Les contreforts de plus de 1,6 kilomètres de haut de l'énorme cratère « Gusev », situé à plus de 80 kilomètres du rover, sont visibles sur la ligne d'horizon du panorama « Evrest » (Planche 13). En partant de la gauche vers la droite, on peut voir les sommets de « Clark Hill » et de « Chawla Hill » en haut de la moitié gauche de l'image de gauche. Vers le centre de la moitié droite de l'image de gauche du panorama, on peut voir au loin les remparts du cratère « Thira » (20 km de diamètre) qui se trouve à plus d'une quinzaine de kilomètres vers l'est. Toujours sur l'image de gauche dans la partie droite de la moitié droite du panorama, on peut voir le bassin « East Basin » et la crête « Haskin Upper Ridge », par laquelle Spirit va amorcer sa descente un peu plus tard (voir le chapitre suivant). Sur la première moitié de l'image de droite, on peut voir les collines « McCool Hill » et « Ramon Hill » qui surplombe « Home Plate » et « Inner Basin », et finalement dans la moitié droite de l'image de droite du panorama, on peut distinguer la crête « Cumberland Ridge » et la vallée « Tennessee Valley ». Plusieurs « Dust Devils » en action sont également visibles sur le cliché panoramique. Spirit est maintenant stationné au sommet de « Husband Hill » qui surplombe les plaines environnantes du cratère « Gusev » à plus de 80 mètres d'altitude. L'astromobile prend des relevés quotidiens de l'atmosphère et photographie à plusieurs reprises les lunes Phobos et Deimos, avant d'amorcer la descente de « Husband Hill » par le versant sud-est au Sol 635.

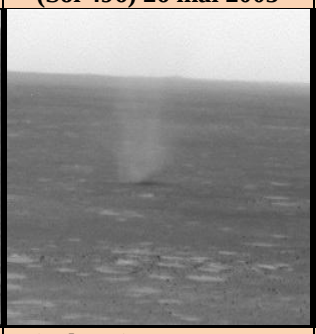
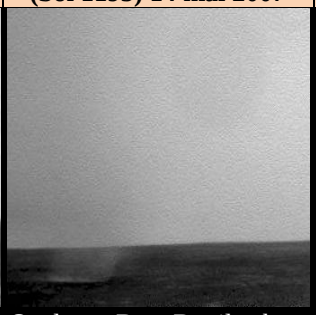
(Sol 456) 15 avril 2005	(Sol 496) 26 mai 2005	(Sol 525) 25 juin 2005
		
(Sol 581) 22 août 2005	**(Sol 616) 27 sept. 2005**	**(Sol 543) 13 juillet 2005**
(Sol 1120) 26 février 2007	**(Sol 1195) 14 mai 2007**	**(Sol 568) 8 août 2005**
		

Figure 73 b : Quelques Dust Devils observés par Spirit (Crédit : NASA/JPL-Caltech)

DU SOMMET À HOME PLATE
(Sol 635 à 746)

L'astromobile Spirit entame la descente du sommet de « Husband Hill » le 16 octobre 2005 au Sol 635, en longeant vers l'est la crête « Lower Haskin Ridge » sur 47 mètres en direction de « East Basin », et franchit le même jour le cap de son cinquième kilomètre parcouru à la surface de la planète Mars. Spirit s'arrête entre les Sols 639 et 648, le temps de faire l'étude de l'affleurement rocheux « Kansas » incluant une séance de brossage sur la cible « Kestrel » au Sol 646, puis le robot repart vers l'est en parcourant 128,5 mètres en 3 séances de conduite sur 9 Sols. Par la suite, l'astromobile met le cap au sud au Sol 655 pour entamer la descente de la crête « Haskin Upper Ridge ». Durant le trajet, le rover en profite pour prendre différents clichés panoramiques de la région, dont une image en noir et blanc pris au Sol 651 (Figure 74) avec une vue plongeante sur « East Basin » à gauche et sur « Haskin Upper Ridge » dans la partie droite de l'image. Et une image en couleur qui zoom sur « East Basin » (Figure 75) prise entre les Sols 653 et 655, soit juste avant que ce dernier ne soit plus visible à l'horizon. On peut voir sur la figure 75 en partant de la gauche vers la droite : les sommets de« Clark Hill » et « Chawla Hill », suivi par les bords du cratère « Thira » à peine visible sur l'horizon lointain à environ 15 kilomètres.

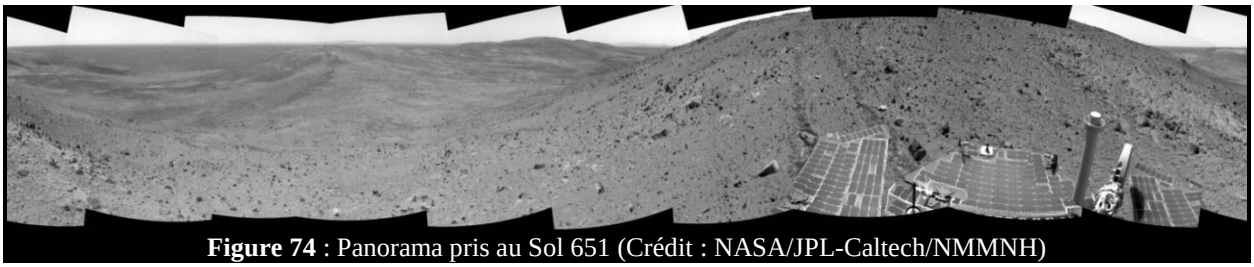


Figure 74 : Panorama pris au Sol 651 (Crédit : NASA/JPL-Caltech/NMMNH)

Figure 75 : Panorama East Basin au Sol 653 (Crédit : NASA/JPL-Caltech/Cornell)

Après avoir parcouru 32 mètres en deux séances de conduite, le rover s'arrête entre les Sols 659 et 663 pour amorcer une vaste campagne d'étude de « Larry's Bench » incluant un brossage au Sol 660. Spirit reprend la route vers le sud-ouest au Sol 664 et parcourt 38 mètres avant de tourner vers le sud-est au Sol suivant. L'astromobile franchit ensuite 84 mètres supplémentaires dans sa descente du versant Est de « Husband Hill » entre les Sols 665 et 677, s'arrêtant devant l'affleurement rocheux « Seminole » entre les Sols 671 et 677 (Figure 75:b)

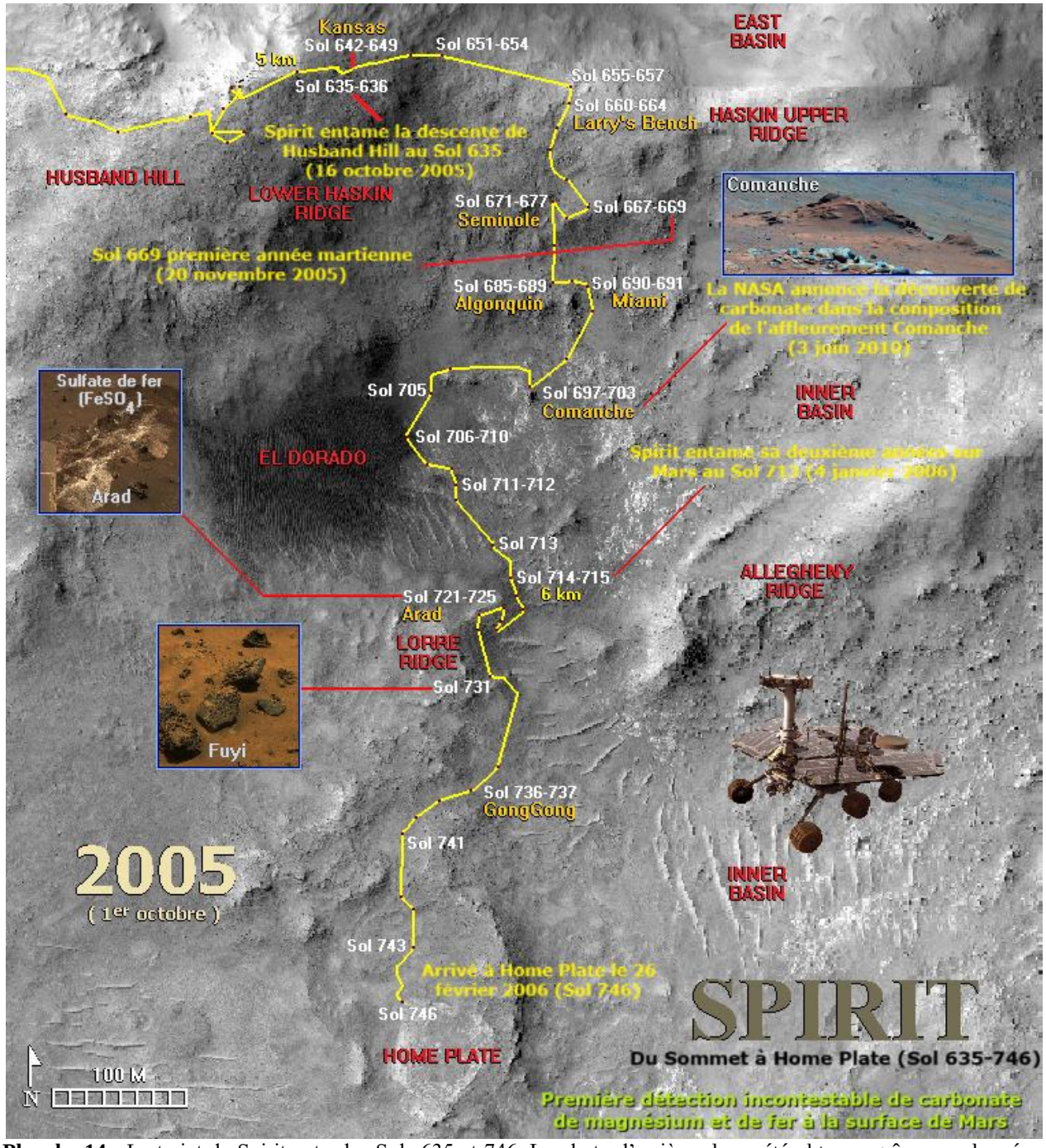


Planche 14 : Le trajet de Spirit entre les Sols 635 et 746. La photo d'arrière-plan a été obtenue grâce aux données fournies par la caméra Hirise de Mars Reconnaissance Orbiteur (MRO) le 22 novembre 2006. Position et trajet des rovers guidées par les cartes de la NASA et de Eduardo Tesheiner.

pour en faire une étude complète incluant deux brossages (« Osceola » au Sol 672 et « Abiaka » au Sol 675). Durant le dernier trajet l'astromobile fête son premier anniversaire martien de 687 jours au Sol 669 le 20 novembre 2005. À la hauteur de l'affleurement « Seminole », le rover va prendre un cliché panoramique couleur de 360° de la région (Planche 15) entre le 23 et le 28 novembre 2005 composé d'une mosaïque de 405 images prises à l'aide de cinq filtres de couleurs différentes. Les analyses de « Seminole » ont dévoilé une forte concentration d'olivine, un

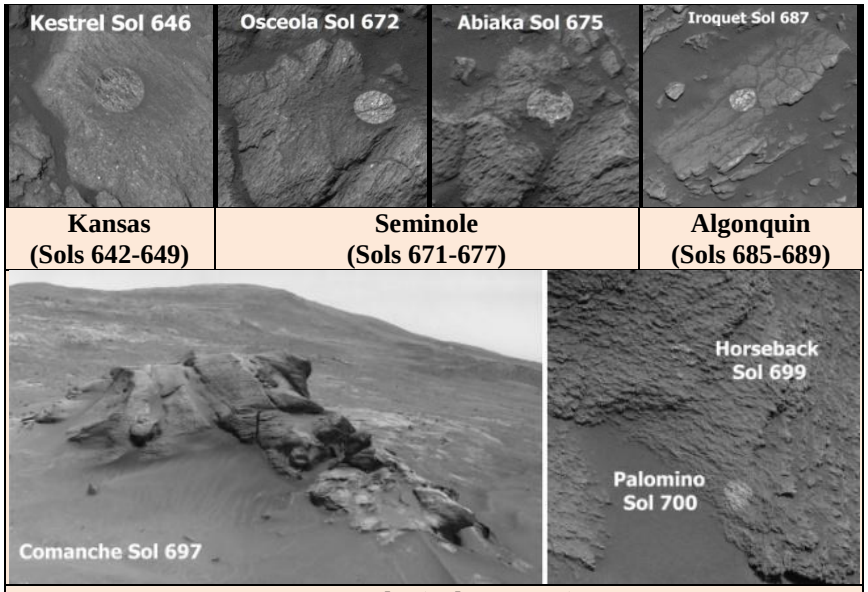


Figure 75 b : (Crédit : NASA/JPL-Caltech/Cornell)

minéral d'origine basaltique et volcanique. La partie centrale du panorama « Seminole » donne sur « Inner Basin » et les sommets de « McCool Hill » et de « Ramon Hill ». L'image de gauche donne sur la crête « Haskin Upper Ridge », tandis que l'image de droite donne sur la crête « Lower Haskin Ridge » qui surplombe l'affleurement rocheux de teinte claire « Seminole » en bas à droite suivit derrière de « Husband Hill ». Le rover se remet en route au Sol 678, et rejoint l'affleurement rocheux « Algonquin » qu'il étudie durant quatre jours entre les Sols 685 et 689 avec brossage au Sol 687. Le lendemain sur le Sol 690, l'astromobile se dirige vers les affleurements rocheux « Miami » et « Comanche » qui se trouvent à une centaine de mètres plus bas. Le robot va étudier plusieurs cibles sur l'affleurement « Comanche » (Figure 75:b et 76) entre les Sols 697 et 703 (Horseback avec brossage au Sol 699, Palomino avec brossage au Sol 700, Cheyenne, Apache, Saupitty, Kickapoo, Chickasaw et Winnebago), avant de reprendre la route vers un champ de dune baptisée « El Dorado » qui se trouve un peu plus loin vers le sud-ouest. L'affleurement « Comanche » est faiblement visible vers le centre de la planche 15 (à gauche de la partie droite de l'image) juste sous « Vau Braun » qui surplombe au loin le plateau de forme circulaire « Home Plate ».

Après avoir réalisé une analyse beaucoup plus approfondie des données, qui ont été recueillies sur la cible « Saupitty » par les trois spectromètres du rover. La NASA a annoncé le 3 juin 2010, soit plus de quatre années et demi plus tard, la présence de carbonate d'origine hydrothermale avec une concentration de plus de 25 % dans la composition de l'affleurement rocheux « Comanche »[11]. Il s'agit de la première détection incontestable de carbonate de magnésium et de fer à la surface de Mars. Contrairement aux données qui ont été

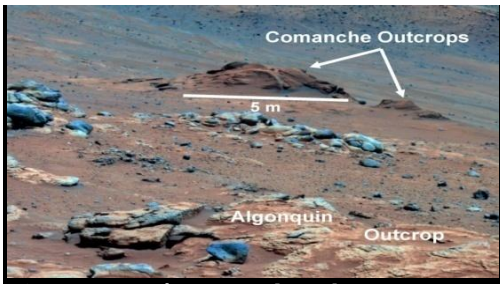


Figure 76 : Découverte de carbonate en 2010 dans l'affleurement rocheux Comanche (Crédit : NASA/JPL-Caltech/Cornell)

[11] Carbonate-Containing Martian Rocks (3 Jun 2010)

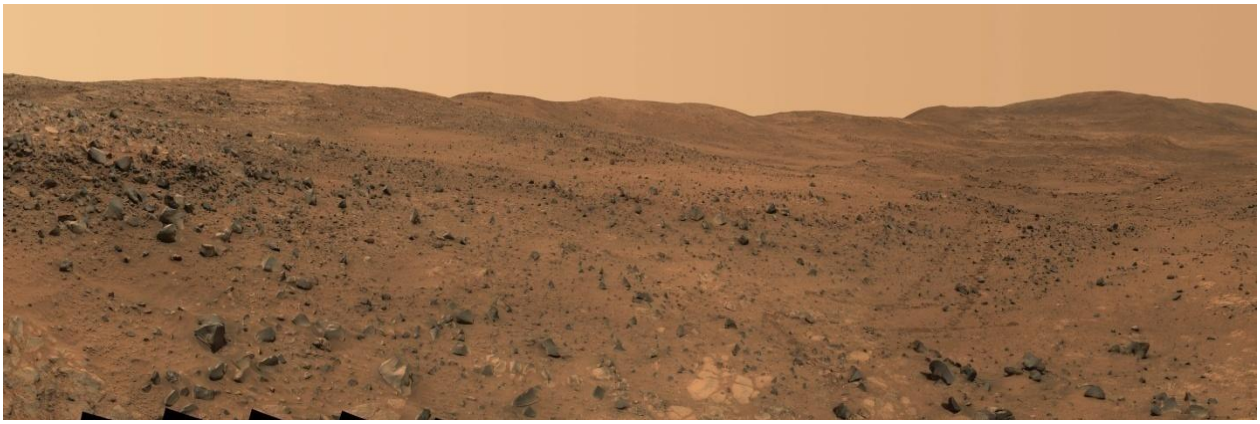


Planche 15 : Panorama Seminole (Crédit : NASA/JPL/Cornell/Bob Deen et Jim Bell)

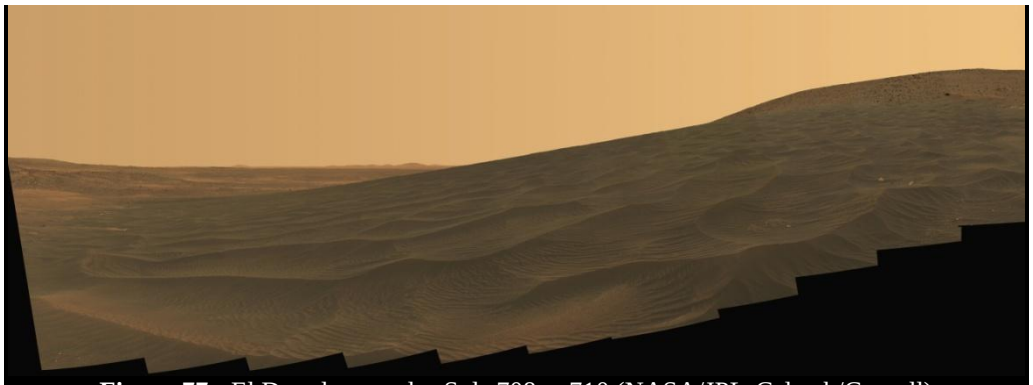


Figure 77 : El Dorado entre les Sols 708 et 710 (NASA/JPL-Caltech/Cornell)

recueillies à l'époque de la mission sur les sulfates, qui suggérait un milieu plus chaud et acide remontant à l'époque du Theiikien, ou à une époque plus récente lors d'épisodes d'éruptions volcaniques épisodiques. La présence de carbonate de magnésium et de fer comme la magnésite ($MgCO_3$) et la sidérite ($FeCO_3$), indique clairement que la planète avait un climat plus chaud et plus alcalin dans son passé, et donc qui était plus favorable à l'émergence de la vie. Et comme nous allons le voir un peu plus loin, la découverte de silice presque pure à « Home Plate » suggère très fortement que le plateau a été formé lors d'activité hydrothermale explosive déclenchée par la rencontre du magma et de l'eau.

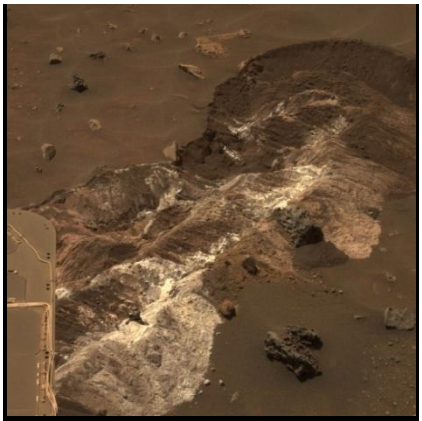


Figure 78 a : Sulfate de fer : Arad (Crédit : NASA/JPL-Caltech/Cornell)

Après avoir parcouru 156 mètres en trois Sols sur les pentes du versant Est de « Husband Hill ». Spirit arrive enfin à la hauteur du champ de dune « El Dorado » au Sol 706, ou le rover fait patiner ses roues dans le sable fin pour creuser une petite tranchée de 30 centimètres de long, que le robot analysera et étudiera par la suite durant quatre jours jusqu'au Sol 710. Durant ce temps entre les Sols 708 et 710, soit durant le congé férié du 30 décembre 2005 au 1er janvier 2006. Le rover prend un cliché panoramique de 160° des environs qui dévoile le magnifique paysage martien composé de champs de dunes de couleur sombre (Figure 77), puis Spirit reprend sa route vers le sud en direction du plateau « Home Plate » dès le lendemain. L'astromobile fête son deuxième anniversaire à la

Planche 15 : Suite du Panorama Seminole.

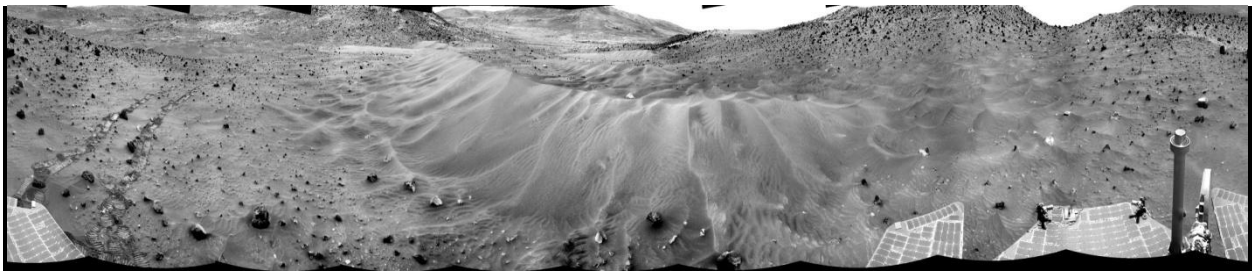


Figure 78 b : Sol 717 (Crédit : NASA/JPL/Jan van Driel)

surface de la planète Mars sur le Sol 713 le 4 janvier 2006, et le lendemain il franchit le cap de son sixième kilomètre parcouru à la surface de la planète rouge en longeant « Lorre Ridge ». Le rover s'arrête près de la cible « Arad » entre les Sols 721 et 725, où il à découvert une étrange matière blanchâtre très brillante exposé à l'intérieur de la tranchée de 30 centimètres de large qu'il a creusée avec ses roues lors d'un virage à la fin d'un trajet, (Figure 78:a), une texture poudreuse plus brillante que la matière exposée dans la tranchée « Paso Robes » au Sol 399. Les instruments du rover ont détecté du sulfate de fer ($FeSO_4$) dans la composition de cette étrange matière blanche. La présence de dépôt de sel de sulfate de fer sous forme d'évaporite enfouie tout juste sous la surface, confirme l'écoulement d'une petite quantité d'eau dans le passé de la planète dans le cratère « Gusev ». Ces dépôts de sulfates se seraient surtout formés de manière épisodique au début de l'histoire géologique martienne, quand il y avait à la surface de la planète une plus grande activité volcanique et une atmosphère plus dense. Les éruptions volcaniques de cette époque auraient émises une grande quantité de soufre (H_2S, SO_4) et un peu de vapeur d'eau dans l'atmosphère martienne, qui par la suite serait retombée à la surface en favorisant des réactions chimiques avec le fer contenu dans le sol de la planète pour former les sulfates.

Spirit poursuit sa route vers le plateau « Home Plate » en longeant sur une centaine de mètres par le sud-est la crête « Lorre Ridge », avant d'arriver à la hauteur d'un groupe de roche vésiculaires basaltique formées par des processus volcaniques baptisée « Fuyi » au Sol 731 (Figure 78:b). Les roches vésiculaires se forment dans des coulées de lave en piégeant des bulles de gaz avant que la roche se solidifie autour des bulles. Lorsque

Figure 78 b : Fuyi GongGong
(Crédit : NASA/JPL-Caltech/Cornell & USGS)

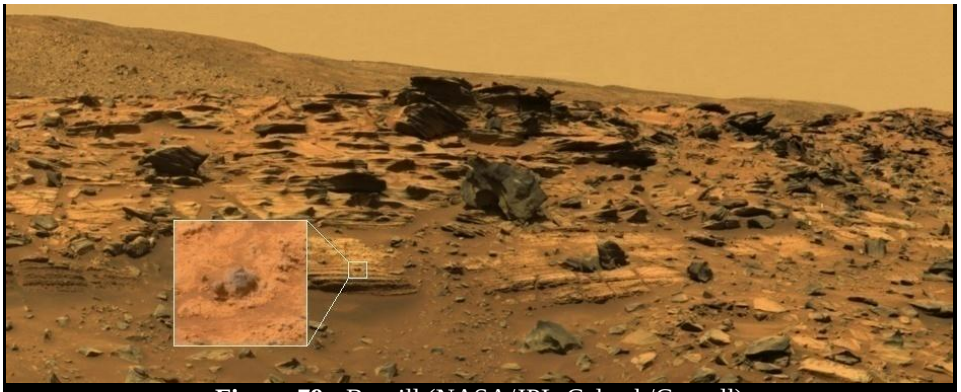


Figure 79 : Barnill (NASA/JPL-Caltech/Cornell)

le gaz s'échappe pendant le processus de solidification, il se forme des trous dans la roche lui donnant une structure poreuse. L'astromobile rejoint ensuite la roche « GongGong » de 3 centimètres de diamètre entre les Sols 736 et 737 (Figure 78:b). La roche « GongGong » s'est formée il y a des milliards d'années dans une masse bouillonnante et agitée de roche en fusion. Il a capturé des bulles de gaz qui étaient piégées à grande profondeur mais qui s'étaient séparées du corps principal de lave en remontant à la surface. Les minuscules bulles de gaz se sont déformées, s'allongeant, lorsque la lave en fusion s'est solidifiée lui donnant une forme d'éponge gelée.

Le rover arrive finalement à la hauteur du plateau « Home Plate » sur le Sol 746 le 26 février 2006, et s'arrête sur une pente de 27^{o} d'inclinaison juste en face de l'affleurement rocheux baptisé « Barnhill » qu'il prend aussitôt en photo (Figure 79), et que Spirit étudiera un peu plus tard au cours de sa mission. Sur l'affleurement « Barnill » nous pouvons apercevoir un petit caillou encastré de quatre centimètres de diamètre, qui s'est déposé avant la solidification complète de la roche en déformant quelque peu les fines couches sédimentaire en forme de lamelles horizontales composées de dépôts de cendres volcaniques. Depuis le départ du sommet de « Husband Hill » au Sol 634, l'astromobile a parcouru une distance de 1 566 mètres en 111 Sols, soit un total de 6,56 km parcourus à la surface de la planète depuis le début de la mission de Spirit sur le sol martien. Le rover Spirit devient ainsi le premier engin construit par l'homme à gravir le sommet d'une colline qui se trouve à la surface d'une autre planète.

L’ÉPOPÉE DE HOME PLATE (Sol 747 à 2210)

Figure 80 : Cool_Papa_Bell : Stars à gauche et Crawfords (Crédit : NASA/JPL-Caltech/USGS/Cornell University)

Le périple de Spirit se poursuit à la hauteur du plateau « Home Plate », par l’étude de l’affleurement rocheux « Barnhill » qu’il effectue entre les Sols 746 et 750. L’affleurement « Barnhill », que l’on peut voir dans la partie centrale de la figure 81, fait partie d’un empilement rocheux plus vaste composés de pavés d’affleurements et de fines strates sédimentaires de cendres volcaniques, situées juste à l’entrée du vaste plateau de forme circulaire de 90 mètres de diamètre sur trois mètres de haut (Figure 81). Après avoir brossé la surface du pavé d’affleurement « Posey » au Sol 753, Spirit grimpe pour la première fois sur le plateau « Home Plate » au Sol 755 et l’explore un peu durant la semaine suivante. L’hiver martien s’approche à grands pas et le rover doit trouver au plus vite un site pour hiverner, de préférence un site incliné quelque peu vers le nord dans le but de faire face au soleil pour maximiser la production quotidienne d’énergie solaire. L’astromobile brosse la surface des cibles « Stars » (Sol 761) et « Crawfords » (Sol 763) pour les étudier, qui se trouvent sur le pavé d’affleurement « Cool_Papa_Bell » (Figure 80). Le robot revient ensuite sur ses pas au Sol 764 et descend du plateau pour le contourner dans le sens des aiguilles d’une montre vers le nord-est, afin de rejoindre un site d’hivernage potentiel qui se trouve à 120 mètres de distance plus au sud sur les pentes du flanc nord-ouest de « McCool Hill ».

Figure 81 : Panorama de 360° pris au pied de Home Plate (Crédit : NASA/JPL-Caltech/NMMNH)

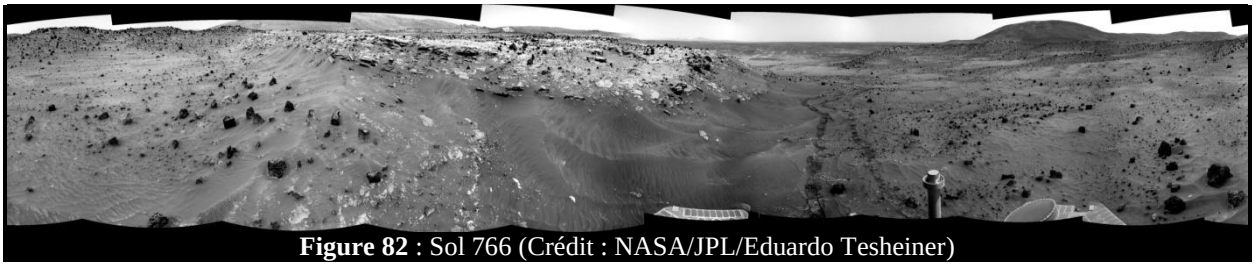


Figure 82 : Sol 766 (Crédit : NASA/JPL/Eduardo Tesheiner)

Planche 16 : Trajet de Spirit entre les Sols 746 et 2210 (du 27 février 2006 au 22 mars 2010). La photo d'arrière-plan a été obtenue grâce aux données fournies par la caméra Hirise de Mars Reconnaissance Orbiter (MRO) de décembre 2006. Position et trajet des rovers guidées par les cartes de la NASA et de Eduardo Tesheiner.

Après avoir parcourus une courte distance de 59,7 mètres en deux séances de roulement, un panorama noir et blanc des environs est entamé au Sol 766 (Figure 82). La partie droite de l'image correspond à la vue arrière, ou l'on peut voir « Husband Hill » suivit au centre de « Home Plate » et à gauche de la crête « Mitcheltree Rigge » qui se trouve dans la direction avant du robot. Treize jours plus tard après avoir contourné le plateau « Home Plate » et traversé « Eastem Valley », les relais électriques du moteur de la roue avant droite du rover tombent

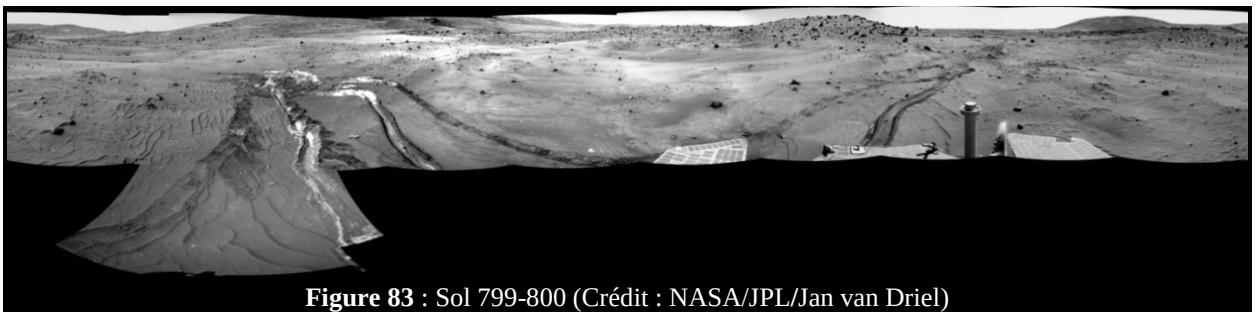


Figure 83 : Sol 799-800 (Crédit : NASA/JPL/Jan van Driel)

Figure 84 : Tyrone (Crédit : NASA/JPL-Caltech/Damia Bouic)

définitivement en panne au Sol 779 le 13 mars 2006, et Spirit doit désormais conduire en marche arrière avec cinq roues en bon état qui devront tirer la roue défectueuse. Le rover éprouve beaucoup de difficultés à progresser dans la région sud-est du plateau « Home Plate » au Sol 787. L'astromobile s'est aventuré sur un terrain qui est de plus en plus sablonneux, qui fait patiner et glisser ses roues, et la roue défectueuse qui traîne sur le sol a creusé une large tranchée profonde baptisée « Tyrone » (Figure 83 et 84). Le robot analyse la tranchée, puis découvre à l'intérieur une grande quantité d'une étrange substance blanchâtre très brillante. L'analyse de la substance effectuée par le spectromètre à émission thermique (Mini-TES) a dévoilé la présence de sulfate de fer ($FeSO_4$). Les difficultés rencontrées sur ce terrain très sablonneux, ont obligé Spirit à abandonner le site d'hivernage qui était situé sur le flanc nord-ouest de « McCool Hill » (Planche16). Le rover a fait demi-tour sur le Sol 799 pour rejoindre un nouveau site d'hivernage qui sera baptisé « Winter Haven 2 » (refuge d'hiver 2). Après avoir parcouru 33 mètres vers le nord-ouest en quatre séances de conduite, le robot rejoint au Sol 805 (8 avril) une petite pente inclinée de 10,8 degrés vers le nord en direction du soleil. L'astromobile va rester sur son nouveau site d'hivernage jusqu'au 5 novembre 2006 (Sol 1010), soit presque 7 mois (205 Sols).

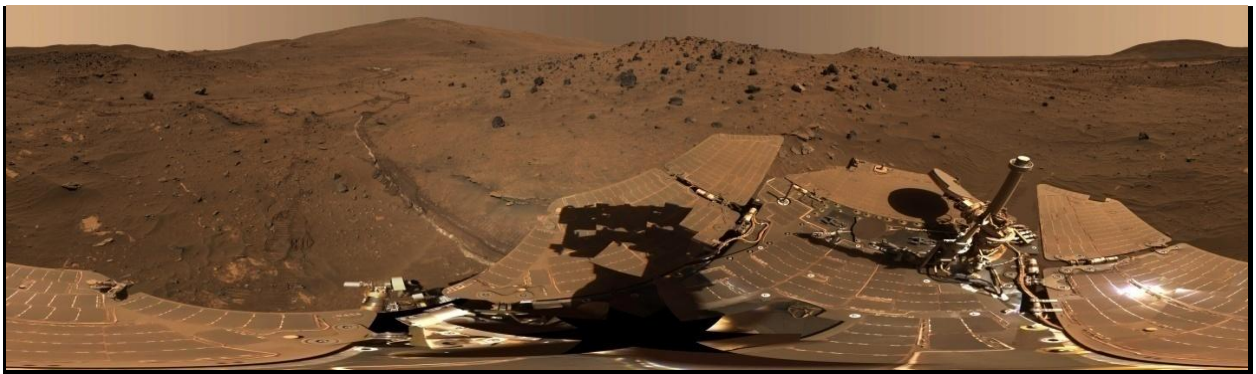


Figure 85 : Panorama McMurdo (Crédit : NASA/JPL/Cornell/Bob Deen et Jim Bell)

Spirit va profiter de cette occasion pour entamer le panorama couleur « McMurdo » de 360° entre les Sols 814 et 932 (Figure 85) du 18 avril au 17 août 2006. Il s'agit du panorama ayant la plus haute résolution prise par les caméras PanCam du rover jusqu'à maintenant,

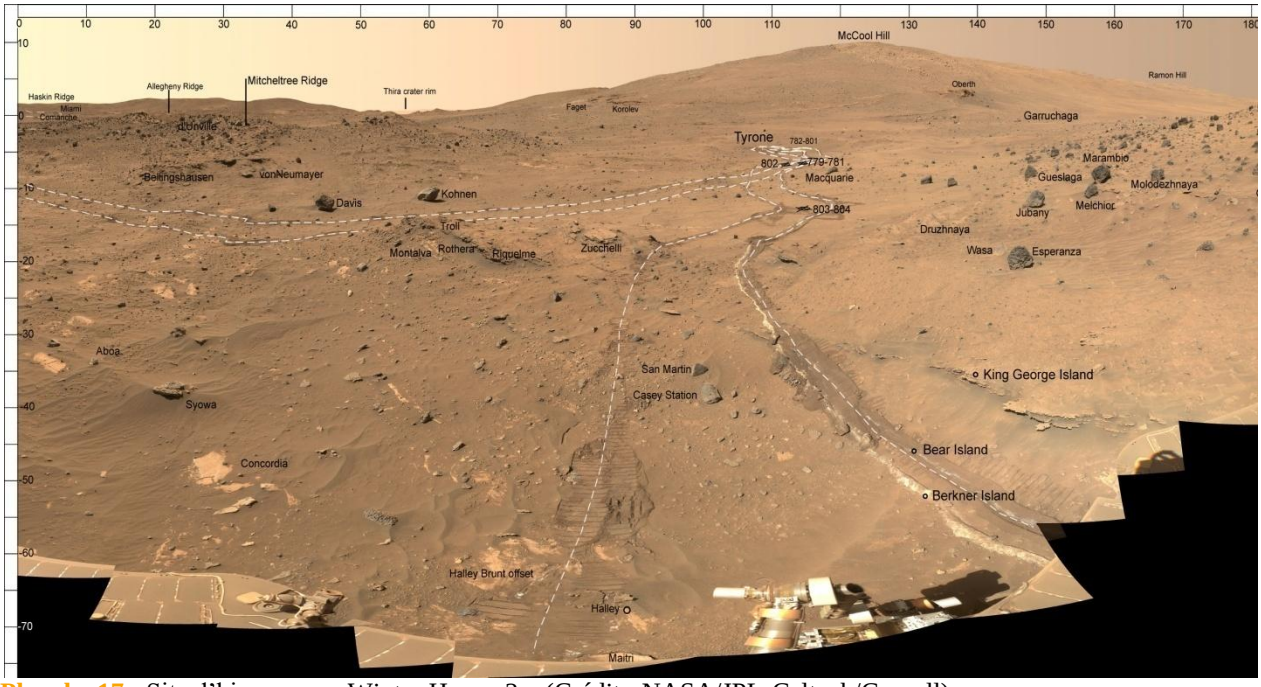


Planche 17 : Site d'hivernage « Winter Haven 2 » (Crédit : NASA/JPL-Caltech/Cornell)

Figure 86 : Progress
(Crédit : NASA/JPL/Jan van Driel)

utilisant pour l'occasion les 13 filtres de couleur pour les 1 499 images qui le composent. Vers le centre de la partie gauche de l'image, nous pouvons apercevoir « Tyrone » au pied de « McCool Hill ». Durant cette deuxième période d'hivernage, l'astromobile fera l'analyse de plusieurs roches qui se trouvent à la portée de son bras robotisé et de ses instruments scientifiques (Planche 17). Incluant la longue étude de la cible de sol « Progress » (Sols 822-870) qui a subit trois brossages au même endroit dénommé « Progress 1 » au Sol 830, de « Progress 2 » au Sol 845 et de « Progress 3 » au Sol 866 (Figure 86). Le rover fera également des lectures quotidiennes de température, de l'opacité du ciel par les poussières en suspension (facteur Tau), et il aura droit à une nouvelle mise à jour de ses logiciels de navigation entre les Sols 872 et 907 (la version R9.2). L'hivernage bat son plein le 8 août 2006 sur le Sol 923 à l'arrivée du solstice d'hiver, avec des températures minimales qui frôlent les –97 °C en fin de nuit (vers les 5 h). La production d'électricité est tombée à un minimum de 278 watts-heure au Sol 933, c'est-à-dire le tiers de ce que les panneaux solaires peuvent générer en plein été. L'électronique des rovers ne pourrait pas résister bien longtemps à des températures si basses, avec des variations journalières de plus de 60 °C. Les soudures des composants électroniques pourraient se fragiliser avec le temps et se rompre à cause de l'ampleur des dilatations thermiques. Pour aider les rovers à résister au froid extrême durant leurs missions, les ingénieurs de la NASA ont installé huit petits générateurs isotopiques (RTG) fonctionnant au Plutonium 238, dans le but de réchauffer les rovers durant les longues nuits froides des hivers martiens.

Les nouvelles mises à jour des logiciels de navigations de Spirit sont testées à partir du Sol 964 (19 septembre), lors de la réception du signal de réinitialisation du système informatique envoyé par la sonde Mars Odyssey. Le même jour, la sonde Mars Reconnaissance Orbiter

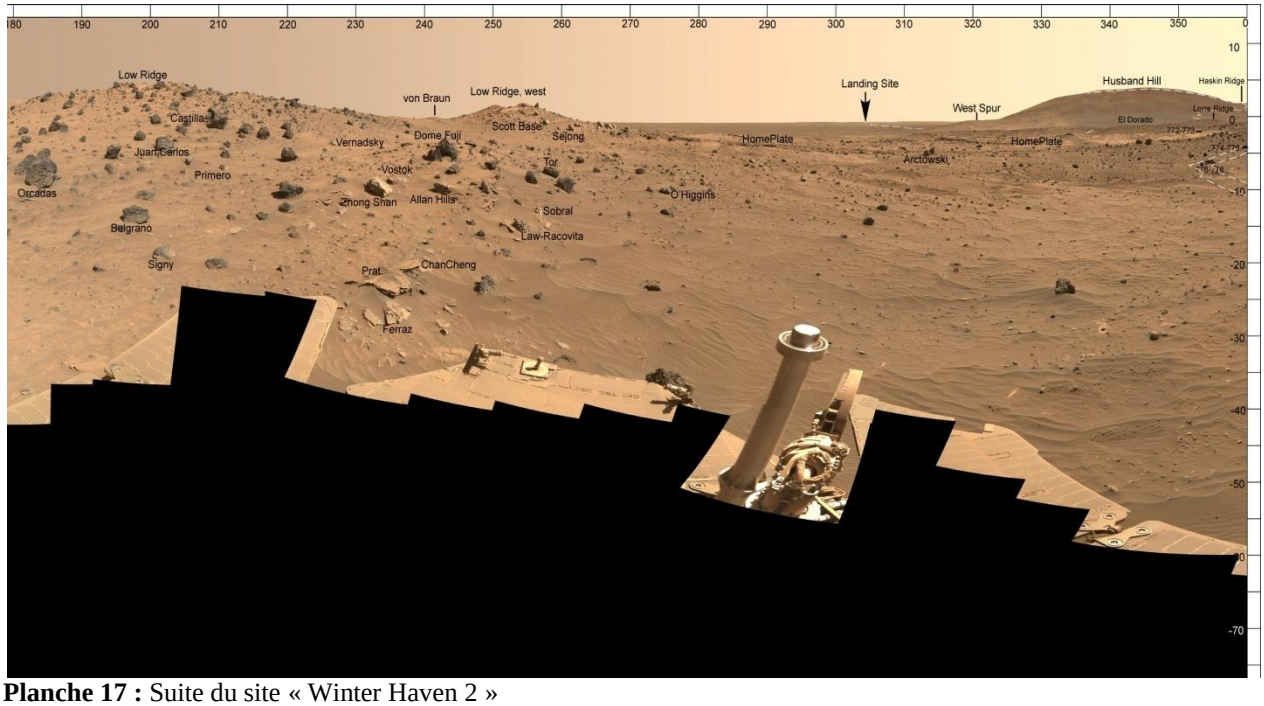


Planche 17 : Suite du site « Winter Haven 2 »

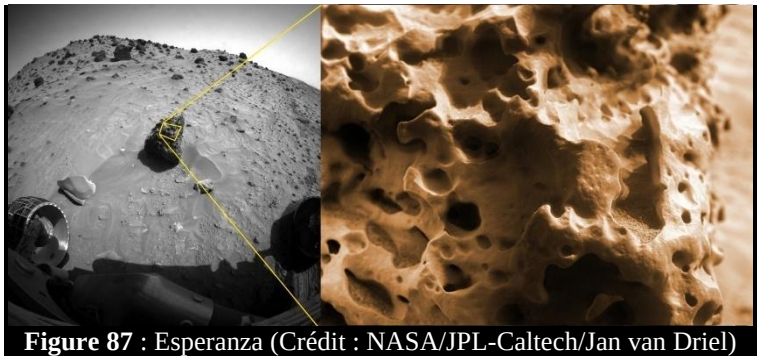


Figure 87 : Esperanza (Crédit : NASA/JPL-Caltech/Jan van Driel)

(MRO) qui est arrivée six mois plus tôt à proximité de la planète (10 mars 2006), complète l'étape finale de son insertion orbitale par freinage atmosphérique. Il était important de tester les nouvelles mises à jour des différents systèmes de navigation des rovers, avant le silence radio de deux semaines qui a eu lieu entre les Sols 991 et 1005 du 16 au 30 octobre 2006 lors de la seconde conjonction solaire. La production d'électricité repasse le cap des 320 watts/heure par jour, et Spirit peut reprendre la route et ses activités d'analyses au Sol 1010 (5 novembre 2006). L'objectif du rover pour les Sols suivants est de reprendre la route vers le sud-est en direction de « Tyrone », pour l'examiner une seconde fois tout en prenant bien soin de garder ses distances. Le 21 novembre (Sol 1026), après avoir effectué plusieurs tentatives de récupération du signal radio depuis le 5 novembre, les communications avec la sonde Mars Global Surveyor (MGS) sont définitivement déclarées perdues. Deux semaines plus tard, Spirit brosse l'affleurement rocheux « King George Island » (Sol 1031) que le rover rencontre sur sa route entre les Sols 1022 et 1035, et qui présente à sa surface une texture granuleuse composée de grain fin d'un millimètre de diamètre. Les analyses ont dévoilées la présence d'hématite (Fe_2O_3) dans la composition de la roche. Le robot se déplace ensuite sur une courte distance afin de rejoindre et d'étudier la roche sombre « Esperanza » entre les Sols 1051 et 1061 (Figure 85 et 87), visible vers le centre de la partie droite de l'image de gauche juste au-dessus de « King George Island » (Planche 17). Une semaine plus tard, Spirit fête sa troisième année à explorer la surface de la planète Mars au Sol 1068 le 4 janvier 2007.

Entre les Sols 1062 et 1081, soit du 28 décembre 2006 au 16 janvier 2007, des tempêtes

Planche 18 : Panorama « Ball Park Pan » (Crédit : NASA/JPL-Caltech/Jim Bell)

Figure 88 : Sol 1073, au pied de Troll

Figure 88 b : Sol 1070

(Crédit : NASA/JPL-Caltech/Cornell/Stuart Atkinson et Damia Bouic)

Figure 89 : Torquas Sol 1141

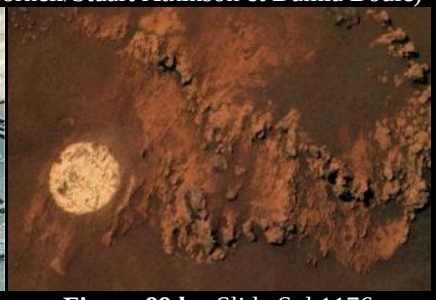


Figure 89 b : Slide Sol 1176

(Crédit : NASA/JPL-Caltech/Cornell, et à droite Stuart Atkinson)

locales de poussières (ou Dust Devils) nettoient les panneaux solaires du rover, qui fait passer la puissance électrique de 276 watts/heure au Sol 1066 à plus de 343 watts/heure deux semaines plus tard sur le Sol 1081. Durant ce temps, l'astromobile fête son troisième anniversaire au Sol 1068. Le rover utilise son outil d'abrasion RAT aux Sols 1070 et 1085, pour nettoyer la surface d'une cible qui se trouve sur l'affleurement « Montalva » situé au pied du site « Troll », afin de l'étudier plus en détaille sur les Sols suivants (Figure 88 et 88:b). Spirit rebrousse chemin sur le Sol 1102 en remontant vers le flanc sud-est de « Home Plate », et le lendemain le 8 février 2007 c'est l'arrivée officielle de l'équinoxe du printemps sur Mars. Cette époque marque également le retour de la saison des tempêtes de poussières locales et globales à la surface de la planète Mars. Trois semaines plus tard, Spirit franchit son septième kilomètre à la surface de la planète au Sol 1123 (le 1er mars), et amorce une vaste campagne le long de « Silicate Valley » situé entre le flanc ouest de « Mitcheltree Ridge » et le côté Est de « Home Plate » (Figure 90). L'astromobile va découvrir dans cette région et pour la première fois dans le cratère « Gusev » des échantillons de sol et de roches qui contiennent de fortes concentrations en silice (SiO_2). Dans la partie gauche de la figure 90 nous retrouvons « Mitcheltree Ridge » suivit dans la partie droite de l'image de « Silicate Valley », du deuxième site d'hivernage « Winter Haven 2 » au loin vers le centre de l'image situé juste sous « Low Ridge » et de « Von Braun », et de « Home Plate » dans la partie supérieure droite de l'image. Le rover par en direction de « Mitcheltree Ridge » entre les Sols 1132 et 1139, puis l'astromobile utilise de nouveau son outil d'abrasion au Sol 1143 (22 mars) pour nettoyer la surface d'une cible qui se trouve sur la roche « Torquas » (riche en magnétite, Fe_3O_4) pour l'étudier (Figure 89).

Planche 18 : Suite du Panorama « Ball Park Pan »

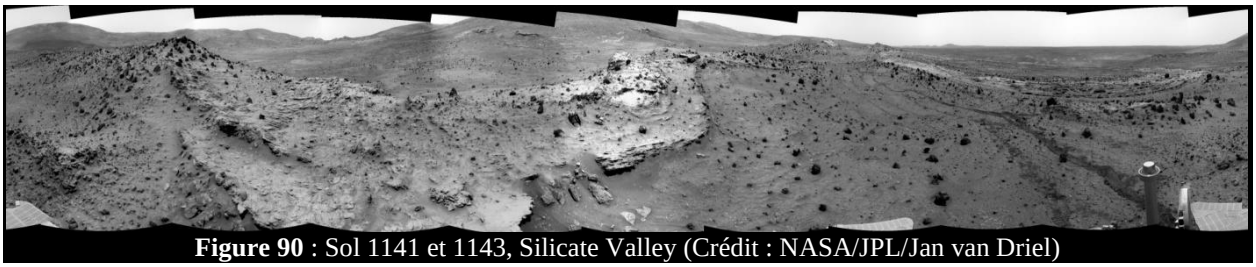


Figure 90 : Sol 1141 et 1143, Silicate Valley (Crédit : NASA/JPL/Jan van Driel)

Figure 91 a-b : Gertrude Weise (Sol 1158 et 1187) (Crédit : NASA/JPL/Cornell)

Le robot repart en direction de « Home Plate » au Sol 1148. La roue défectueuse de Spirit qui traîne toujours sur le sol, a creusé un sillage profond de 20 centimètres de long baptisé « Gertrude Weise » sur le Sol 1150 le 29 mars (Figure 91:a, et un peu plus tard pour les figures 91:b et 92), et découvre à l'intérieur une étrange substance blanchâtre très brillante que le rover analysera un peu plus tard au cours de sa mission. Entre les Sols 1154 et 1159, soit du 2 au 7 avril, Spirit analyse l'affleurement rocheux « Elizabeth Mahon », un gisement nodulaire qui se trouve entre les traces de roues du rover, et découvre la présence de silice pure à plus de 72%. L'analyse du sillon de « Gertrude Weise » effectué à plusieurs reprises par le spectromètre à émission thermique (Mini-TES) et par le spectromètre à rayon X et alpha (APXS), a dévoilé la présence de silice (SiO_2) pure à 90%. Une telle concentration de silice implique la présence de vapeurs d'eau, ou de pluies acides chaudes dans le passé de la planète. Entre les Sols 1169 et 1174, le rover prend le cliché panoramique couleur « Ball Park Pan » de la région ouest de « Silicate Valley », qui présente le versant Est du plateau « Home Plate » (Planche 18). Durant ce temps Spirit en profite pour faire l'étude de plusieurs cibles sur des affleurements rocheux, dont entre autres « Madeline English », « Belles » et « Everett ». Après avoir effectué un court déplacement de 0,7 mètres le lendemain, le robot brosse la surface de l'affleurement « Slide » (Sol 1176) qui présente des nodules clairs à sa surface pour l'étudier jusqu'au Sol 1178 (Figure 89:b). Spirit reprend ensuite la route vers le nord entre les Sols 1182 et 1200 (Figure 90:c), pour aller rejoindre de nouveau les empreintes de roues remplis de substance blanche dénommé « Gertrude Weise ».

Figure 91 c : Sol 1187, avec Gertrude Weise au centre de la partie gauche (Crédit : NASA/JPL/Jan van Driel)

Figure 92 : Gertrude Weise au Sol 1202 (Crédit : NASA/JPL-Caltech/Cornell)

Différents processus géologiques associés à l'activité volcanique, ou à des geysers d'eau chaude de type hydrothermal, peuvent expliquer la présence de dépôts de silice en plus forte concentration. L'eau gelée contenue dans le sol martien peut à l'occasion être réchauffée, soit lors de la chute d'une météorite ou par l'entrée en activité d'un volcan. L'eau remonte alors vers la surface par les fissures et les crevasses, se chargeant de composés minéraux dissous qu'elle rencontre sur sa route, puis s'évapore par sublimation à la surface ou retourne dans le sol de la planète, en favorisant la précipitation de la silice et des sels de sulfates sous forme de dépôts. De tels dépôts de silice se retrouvent sur Terre autour des cheminées hydrothermales ou à proximité des volcans. Il s'agit peut-être d'ancien dépôt qui remonterait à plus de 3,8 milliards d'années, soit à l'époque du Noachien[12] ou à l'époque située entre le Phyllosian et le Theiikian, selon la chronologie basée sur la minéralogie[13] fournie par l'instrument OMEGA de Mars Express (voir l'introduction). Il avait à cette époque une plus grande activité volcanique sur la planète, où l'eau devait circuler plus librement et en plus grande quantité à la surface maintenue à l'état liquide par la pression plus forte d'une atmosphère plus dense. Le sol aurait été recouvert par la suite par une fine couche de poussière composée d'oxyde de fer (hématite) durant l'époque plus récente de l'Amazonien ou du Siderikian, qui correspond à l'ère géologique actuelle qui est plus aride et plus sèche. La forme circulaire du plateau « Home Plate » semble indiquer qu'il s'agit d'un ancien site d'activité hydrothermale de ce type[14].

Spirit se déplace à nouveau vers la crête du versant Est du plateau « Home Plate » au Sol 1201, dans le but de rejoindre et d'étudier de nouvelles cibles étendues sur le sol martien. L'outil

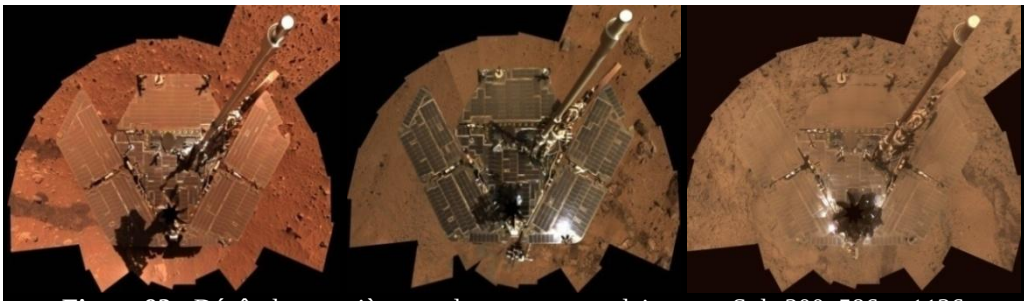


Figure 93 : Dépôt de poussières sur les panneaux solaires aux Sols 300, 586 et 1136 (Crédit : NASA/JPL/Cornell, et Sols 586-1136 : Crédit : NASA/JPL-Caltech/Cornell)

[12] Scott et Carr, 1978
[13] Global mineralogical and aqueous Mars history derived from OMEGA/Mars Express data, Bibring et al. 2006
[14] Rocks of the Columbia Hills, Steve Squyres et al., 2006

Figure 94 : Sol 1215, perché sur le flanc Est de Home Plate (Crédit : NASA/JPL/Jan van Driel)

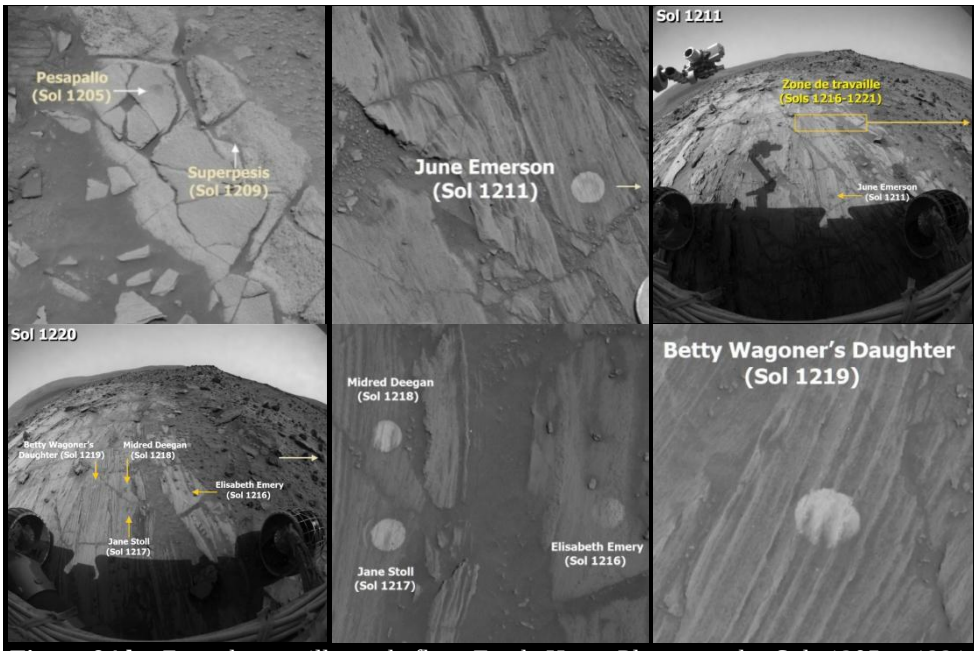


Figure 94 b : Zone de travaille sur le flanc Est de Home Plate entre les Sols 1205 et 1221 (Crédit : NASA/JPL-Caltech/Cornell)

d'abrasion RAT est utilisé à plusieurs reprises entre les Sols 1205 et 1221 (Figure 94 et 94:b), pour polir et étudier la surface des pavées d'affleurements « Pesapallo » (Sol 1205), « Superpesis » (Sol 1209) et « June Emerson » (Sol 1211). Puis vient le tour du pavé d'affleurement « Elisabeth Emery » à être brossé au Sol 1216, suivit de trois cibles qui se trouve sur le même affleurement : « Jane Stoll » (Sol 1217), « Midred Deegan » (Sol 1218) et de « Betty Wagoner's Daughter » (Sol 1219). L'astromobile retourne ensuite dans « Silicate Valley » au Sol 1221 en roulant sur une courte distance d'environ 8 mètres pour rejoindre l'affleurement « Nancy Warren » (Sols 1225-1232) que le robot va brosser au Sol 1226 (Figure 94:c). Le début du deuxième printemps a été très bénéfique pour Spirit, les premières tempêtes de vents ont nettoyé la poussière qui s'était accumulée sur les panneaux solaires du rover depuis les 400 derniers Sols (Figure 93). La puissance électrique a augmenté de plus de 150 watts/heure en seize jours, passant de 600 watts/heure au Sol 1224 (13 juin) à plus de 750 watts/heure au Sol 1240 le 29 juin, soit tout juste avant l'arrivée d'une gigantesque tempête globale de poussières. Spirit écrase sur son chemin une petite roche baptisée « Innocent Bystander » au Sol 1232, que le robot analysera occasionnellement entre les Sols 1252

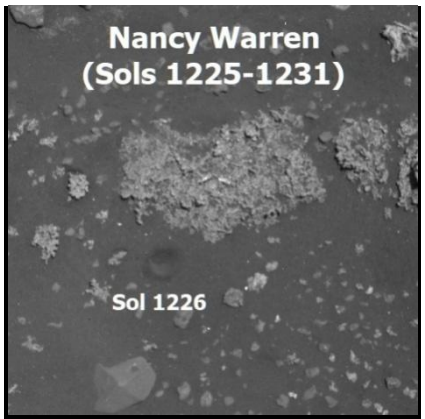


Figure 94 c : Nancy Warren (Crédit : NASA/JPL-Caltech/Cornell)

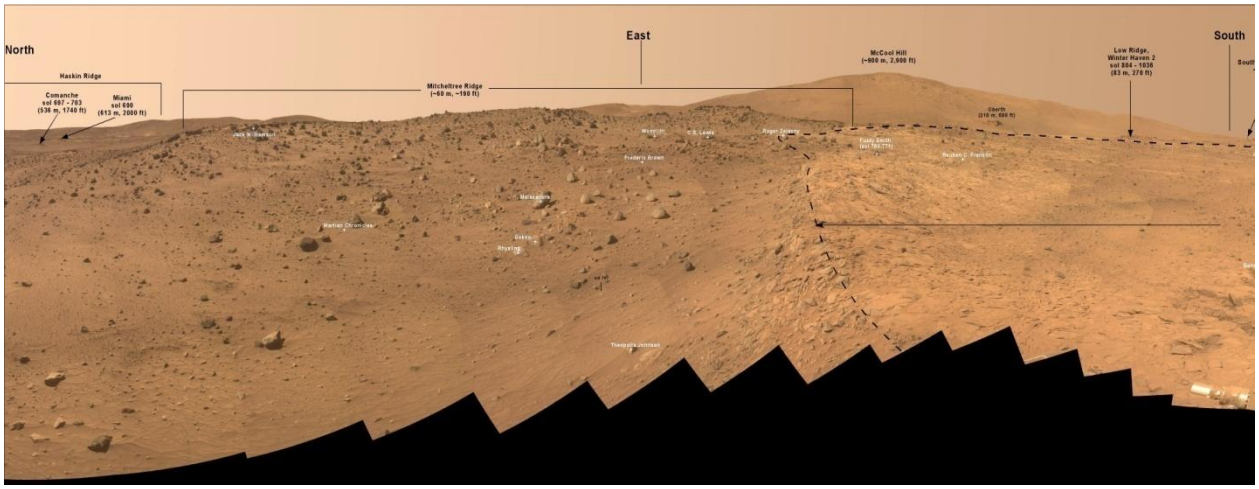


Planche 19 : Détail du site d'hivernage « Winter Haven 3 », fait à partir du panorama Bonestell (Crédit : NASA/JPL-Caltech/Cornell)

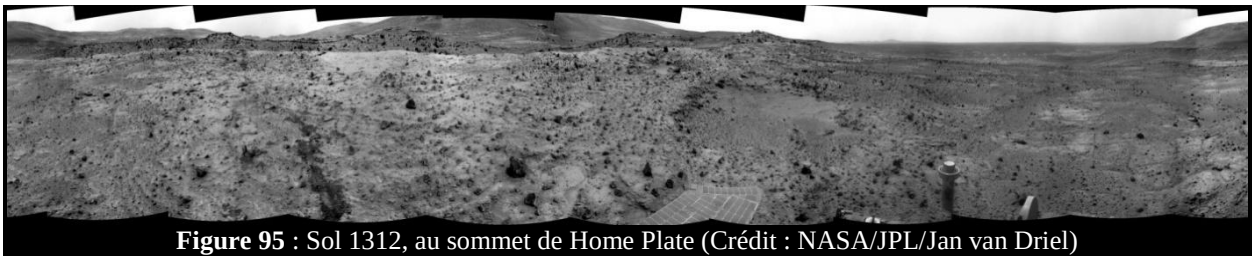


Figure 95 : Sol 1312, au sommet de Home Plate (Crédit : NASA/JPL/Jan van Driel)

Figure 95 a : Innocent Bystander (Crédit : NASA/JPL-Caltech/Cornell)

et 1287 (Figure 95:a, et que l'on peut également voir dans la partie centrale située à l'extrême droite de la figure 91:c), le temps que la tempête de poussières globale se calme un peu. La tempête de poussière devient de plus en plus violente entre les Sols 1245 et 1274, soit du 4 juillet au 3 août 2007, et le ciel devient de plus en plus opaque aux rayons du soleil par l'augmentation des poussières en suspension dans l'atmosphère martienne, avec un facteur Tau supérieur à 4. Le bilan d'énergie descend jusqu'à une puissance journalière de 261 watts/heure au Sol 1273, avant que la tempête n'ait fini par se stabiliser trois semaines plus tard sur le Sol 1293 (22 août). Entre temps, Spirit établit un nouveau record au Sol 1281 le 10 août, en dépassant la longévité de 3 ans 7 mois et 8 jours de Viking 2.

Le ciel s'éclaircit quelque peu, mais la poussière en suspension dans l'atmosphère continue de tomber et de s'accumuler sur les panneaux solaires du rover en les recouvrant jusqu'à 60%. La puissance électrique reste basse, atteignant à peine les 325 watts/heure : soit plus de la moitié de ce qu'elle était deux mois plus tôt au Sol 1240. Spirit monte pour la troisième fois sur le plateau « Home Plate » au Sol 1306 le 5 septembre 2007, afin d'amorcer une vaste campagne d'exploration de son sommet (Figure 95). L'astromobile brosse la surface d'une cible se trouvant sur le pavé d'affleurement « Texas Chili » au Sol 1326, puis l'étudie durant les quatre Sols suivants. L'exploration du « Home Plate » commence dans la direction sud-est du plateau, puis dans la direction nord-ouest à partir du Sol 1346. Entre temps, situé à l'extrémité sud du plateau Spirit fête son deuxième anniversaire martien sur le Sol 1338 le 8 octobre 2007. La surface

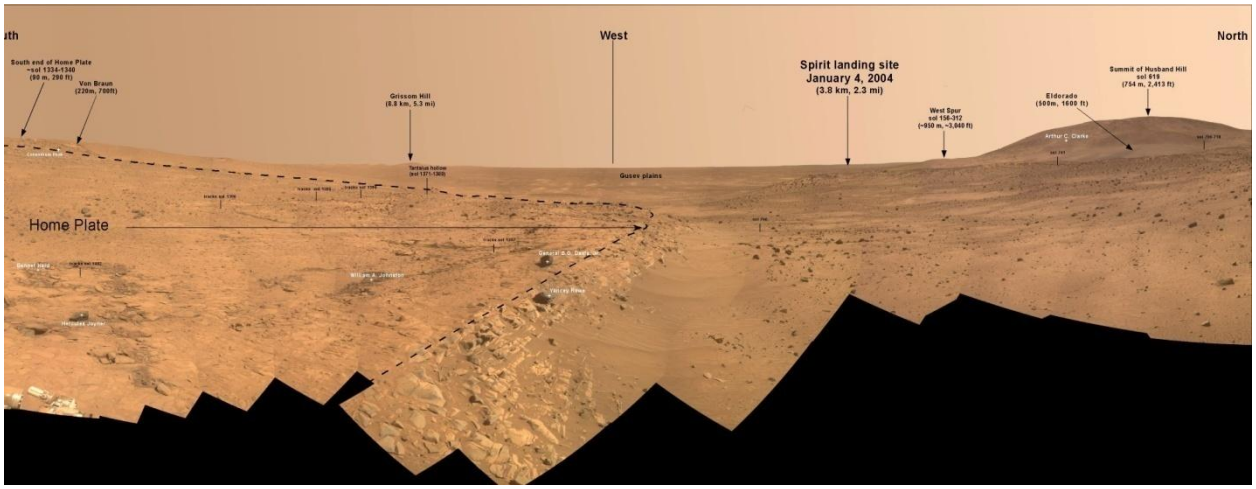


Planche 19 : Suite du site d'hivernage « Winter Haven 3 »

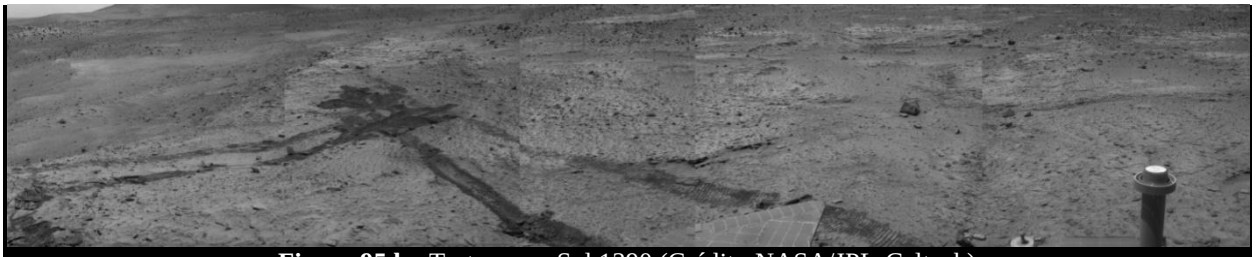


Figure 95 b : Tartarus au Sol 1390 (Crédit : NASA/JPL-Caltech)

de la roche « Humboldt Peak » est brossée au Sol 1341 pour être étudié jusqu'au Sol 1345, puis s'est le tour de l'affleurement rocheux « Pecan Pie » (Sols 1366-1370) qui sera brossé au Sol 1368. Après s'être dégagé du sable fin et sablonneux du petit cratère « Tartarus » (Figure 95:b), où le rover est resté coincé une dizaine de jours entre les Sols 1378 et 1388. Spirit se remet en route vers son troisième refuge hivernal « Winter Haven 3 » qui est situé cette fois-ci sur le bord nord-est du plateau « Home Plate » (Planche 19). Huit jours après l'arrivée de l'équinoxe d'automne au Sol 1406 le 17 décembre 2007, le rover se stationne sur un petit promontoire rocheux de deux mètres de haut qui présente une inclinaison de 13 degrés vers le nord en direction du soleil. L'astromobile se positionne ensuite près du pavé d'affleurement « Chanute », dans le but d'entamer une longue séance d'étude et d'analyse des environs entre les Sols 1409 et 1434, et durant lequel Spirit va utiliser son outil d'abrasion (RAT) au Sol 1427 pour polir et nettoyer la surface de l'affleurement, dans l'objectif de faire des analyses comparatives entre une surface brute et une surface propre et nettoyer avant d'être présenté aux instruments scientifique du rover. Durant sa longue pause hivernale, le robot va utiliser sa RAT à trois autres reprises sur des pavés d'affleurements se trouvant à proximité. Une première fois pour brosser et nettoyer la surface d'une cible se trouvant sur l'affleurement rocheux « Freeman » au Sol 1450, qui sera par la suite étudié jusqu'au Sol 1455. Et une nouvelle fois à seulement 0,5 mètre plus loin lors d'une nouvelle campagne d'étude de terrain effectuée entre les Sols 1475 et 1491, ou la RAT sera utilisé à deux reprises pour brosser et nettoyer la surface du pavé d'affleurement « Wendell Pruitt » au Sol 1479 et 1484 (Figure 95 c).

Entre temps l'inclinaison du rover passera à 29,9 degrés au Sol 1464, et le bilan énergétique n'est plus qu'à 277 watts/heure par jour en moyenne. Depuis que Spirit a quitté son deuxième site d'hivernage « Winter Haven 2 » au Sol 1010 le 5 novembre 2006, l'astromobile a

Figure 95 c : Sol 1368 Pecan Pie Sol 1496 Freeman & Wendell Pruitt Sol 1710
Crédit : NASA/JPL-Caltech

parcouru une distance de 550,63 mètres en 13 mois et demi jusqu'au Sol 1406 (17 décembre 2007), dont 345,03 mètres qui ont été parcourus uniquement sur le plateau « Home Plate ». Le rover fête son quatrième anniversaire sur Mars au Sol 1424 le 4 janvier 2008, et restera stationné sur son troisième site d'hivernage« Winter Haven 3 » une année entière, soit jusqu'au Sol 1782 (8 janvier 2009). Pendant ce temps, Spirit entame le vaste panorama couleur « Bonestell » de 360° (Planche19) à partir du Sol 1477 le 28 février 2008, composé de 246 images prises à l'aide de trois filtres de couleurs différents de la PanCam, que le rover finira de cadrer huit mois plus tard sur le Sol 1691 (5 octobre 2008). Entre temps, la sonde Phoenix se pose sur Mars le 25 mai au Sol 1559. Le bilan d'énergie descend à 220 watts/heure par jour à l'approche du solstice d'hiver qui arrive un mois plus tard le 25 juin 2008 au Sol 1591, et pour économiser l'énergie du rover les activités et la fréquence des communications vers la Terre sont réduites à leurs minimas. Les relevés de l'opacité atmosphérique par les poussières (facteur Tau) indiquent que le ciel de l'hiver 2008 a été plus clair que celui des hivers martiens de 2004 et de 2006.

L'excentricité de l'orbite de la planète Mars (0,0934) est plus grande que celle de la Terre (0,0167), la durée des saisons varie donc d'une manière plus importante sur Mars que sur Terre. Dans l'hémisphère austral (sud) de la planète Mars, le printemps et l'été martien arrivent au moment où la planète sur son orbite est la plus rapprochée du soleil (périhélie), avec une durée moyenne de 296.65 jours donnant des étés courts mais chauds. Tandis que l'automne et l'hiver arrivent au moment où la planète sur son orbite est la plus éloignée du soleil (aphélie), avec une durée moyenne de 372 jours et un flux solaire moyen qui est plus de la moitié de celui de la Terre. Les hivers dans l'hémisphère nord qui arrive au périhélie de l'orbite, sont donc plus doux et plus courts, tandis que les hivers dans l'hémisphère sud qui arrive à l'aphélie de l'orbite sont plus longs et plus froids. L'inclinaison axiale de l'axe de rotation de la planète Mars (25^{o}) est plus élevée que celui de la Terre (23^{o}), et il pointe dans la direction opposée du soleil lors de l'arrivée du solstice d'hiver dans l'hémisphère sud de la planète, qui se produit à plus de 249,2 millions de kilomètres du soleil (aphélie), contre 206,6 millions de kilomètres (périhélie) au solstice d'été ou l'axe de rotation pointe alors en direction du soleil. Ces contrastes d'insolations saisonnières favorisent des variations de température très importantes dans l'hémisphère sud de la planète, ce qui fait varier la pression atmosphérique de près de 10% suivant les périodes de gels et de dégels du gaz carbonique du pôle Sud, et qui vers la fin du printemps favorise la création des tempêtes de poussière régionales et parfois globales (avec une périodicité moyenne de trois années martienne). Au Sol 1700 (14 octobre 2008), le niveau des poussières atmosphériques commence

Figure 96 : Panorama Stapledon Sol 1802 (Crédit : NASA/JPL-Caltech)

à remonter, et le samedi 8 novembre une alerte de tempête de poussière régionale est émise par le réseau de surveillance de Mars Reconnaissance Orbiter (MRO), mais par chance elle finira par dévier vers le nord.

Le Sol 1718 (2 novembre 2008) est marqué par la fin de la mission de Phoenix sur Mars qui aura eu une durée de 157 Sols. Une semaine plus tard, les niveaux d’énergies atteignent leur seuil critique sur le Sol 1725 (9 novembre 2008) avec seulement 89 watts/heure et un facteur Tau qui grimpe à 2,3. Un niveau d’énergie qui est situé juste à la limite de la survie du rover, et survivre aux températures basse et extrême du troisième hiver martien a été un défi très difficile pour l’astromobile, mais un défi qui a été relevé avec succès. Les températures diurnes du 25 novembre (Sol 1741) ont été de –30 °C le jour à plus de –95 °C la nuit pour Spirit, et de –27 °C à –107 °C pour Opportunity qui est situé de l’autre côté de la planète à une latitude un peu plus haute. Les niveaux d’énergies remontent un peu les jours suivants pour se stabiliser à 192 watts/heure durant la troisième conjonction solaire, qui a eu lieu du 30 novembre au 15 décembre 2008 entre les Sols 1746 et 1760, mais redescend aussitôt par la suite aux Sols suivants. L’équinoxe du printemps martien arrive dix jours plus tard sur le Sol 1770 le 26 décembre, et le bilan d’énergie du rover ne remonte pas en haut des 200 watts/heure avant le 27 janvier 2009 (Sol 1802). L’astromobile a parcouru sa plus petite distance annuelle avec seulement 4,08 mètres pour toute l’année 2008. Entre temps, Spirit entame sa cinquième année sur Mars au Sol 1780 le 4 janvier 2009, et l’astromobile se remet enfin en route deux jours plus tard sur le Sol 1782. Le rover éprouve quelques difficultés à descendre la pente très sablonneuse de son dernier site d’hivernage, mais il finit par reprendre définitivement la route au Sol 1793, et découvre à nouveau de la silice pure à 70% sur le Sol 1798 le 23 janvier 2009 en examinant la cible « Stapledon », qui se trouve à l’intérieur de ses traces. Le rover prend le cliché panoramique « Stapledon » au Sol 1802 (Figure 96) avec ses caméras de navigation (NAVCAM), qui montre le lieu du troisième site d’hivernage que l’on peut voir au centre de la partie droite de l’image en suivant les traces du robot sur le sol martien.

À partir du 3 février 2009 sur le Sol 1809, la production d'énergie s’est maintenue en moyenne à plus de 202 watts/heure par jour. Spirit qui est pris dans le sable au pied d’une petite pente très sablonneuse de 14 degrés d’inclinaison depuis le Sol 1806, doit abandonner son projet

Figure 97 : Panorama pris au Sol 1843 par les caméras NAVCAM du rover (Crédit : NASA/JPL-Caltech)

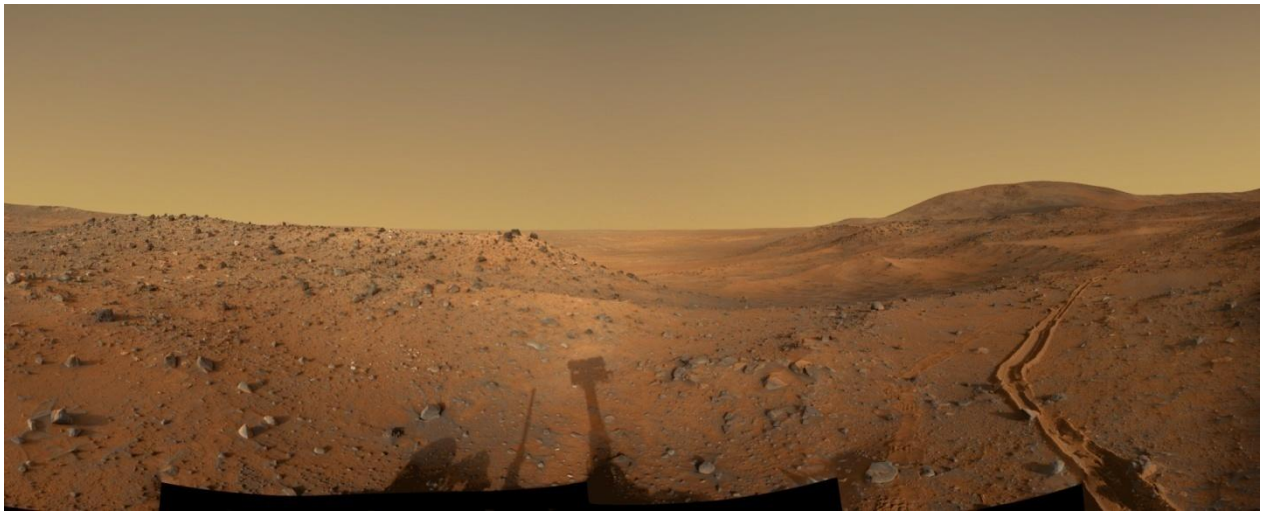


Planche 20 : Dans le cadre de la commémoration du dixième anniversaire de la mission MER en janvier 2014, ce magnifique panorama couleur a été publié. Il a été pris au Sol 1984 le 2 août 2009 à une heure locale de 07:00. Il s'agit d'une mosaïque en noir et blanc de Damia Bouic, qui a été par la suite colorié par Don Davis. (Crédit : NASA/JPL/Cornell/Damia Bouic/Don Davis)

Figure 98 : Kit Carson (Crédit : NASA/JPL-Caltech)

de monter sur le plateau « Home Plate » pour se diriger vers le nord-est, où le rover glisse et reste coincé de nouveau dans du sable très doux. Au centre de la figure 97 qui a été pris par les caméras de navigation (NAVCAM) du rover au Sol 1843 (10 mars 2009), on peut voir les traces qui résultent de cette longue phase de désensablement. Le rover va néanmoins réussir à se dégager de ce bourbier sablonneux au Sol 1849 (16 mars), et reprendre sa route vers le nord-ouest en contournant le plateau « Home Plate » dans le sens contraire des aiguilles d'une montre, dans le but de rejoindre le fossé « Goddard » et le petit monticule « Von Braun » qui se trouvent 300 mètres plus loin dans la région sud du plateau « Home Plate ». Une semaine plus tard sur le Sol 1856, l'astromobile tourne au sud-ouest pour emprunter la route de « West Valley », qui se trouve entre le monticule « Tsiolkovsky » et le flanc ouest du plateau « Home Plate ». Le rover reçoit une nouvelle version de son logiciel de navigation dénommé « Field D-Star » (R9.3) entre les Sols 1858 et 1860, puis il reprend sa route vers le sud au Sol 1861. L'astromobile qui remue et laboure énormément le sol avec sa roue défectueuse, découvre à l'intérieur de ses traces une matière blanche riche en silice et en sulfates de fer. Le site sera baptisé « kit Carson » (Figure 98), et la substance blanchâtre sera étudiée par les différents instruments scientifiques du rover jusqu'au Sol 1866.

Après avoir parcouru 76,4 mètres depuis le Sol 1856 en six séances de roulement quotidien. Un problème informatique survient entre les Sols 1872 et 1885, et va immobiliser le rover dans « West Valley » durant les deux semaines suivantes. Le robot souffre d'une anomalie d'amnésie (mémoire flash défectueuse) et de réinitialisations de son système informatique de bord, qui a déjà été rencontré à plusieurs autres reprises au cours de la mission sur Mars. Après avoir parcouru péniblement trois mètres dans le sable fin entre les Sols 1886 et 1892, (du 23 au 29 avril), le rover reste définitivement coincé dans le sable au site baptisé « Troy » (Troie) à seulement 150 mètres de « Von Braun ». Les trois roues du côté gauche de l'astromobile sont

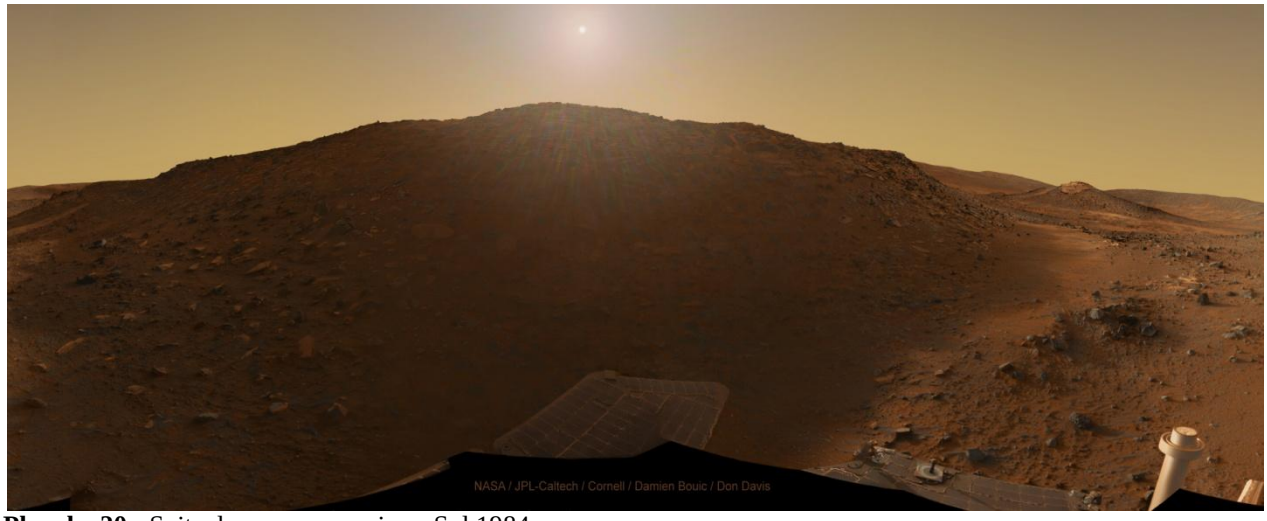


Planche 20 : Suite du panorama pris au Sol 1984

partiellement ensablées dans une fausse sablonneuse baptisée « Ulysse » (Figure 100 et 101), et Spirit n'arrive plus à se dégager de ce bourbier qui se trouve sur le bord d'un petit cratère qui était caché dans le sol, recouvert d'une fine croûte plus résistante baptisé « Scamander » de huit mètres de diamètre sur 20 centimètres de profondeur. Le panorama de la Figure 99, qui a été pris par les caméras de navigation (NAVCAM) du rover au Sol 1891 (28 avril 2009), nous montre la vue arrière de l'astromobile juste avant d'arriver à « Troy » le même jour. La partie droite du panorama correspond à la vue arrière, par rapport au sens de déplacement du robot sur le sol martien qui progresse toujours en marche arrière, tandis que la partie gauche correspond à la vue avant. On peut voir sur l'image à partir de la droite en allant vers la gauche : le flanc ouest de « Home Plate », le sommet de « Husband Hill », le monticule « Tsiolkovsky » situé à gauche des traces du rover sur le sol, et « Von Braun » vers lequel se dirigeait le robot avant de s'immobiliser définitivement dans le sable fin de « Troy ».

Figure 99 : Vue arrière près de Troy (Crédit : NASA/JPL-Caltech)

Entre temps, le rover en profite pour effectuer différentes analyses de « Ulysse » (Figure 100 et 101), tout en prenant soin de prendre des clichés panoramiques du paysage martien qui se trouve aux alentours. La matière blanche à l'intérieur de « Ulysse » contient la plus forte teneur en soufre composé d'un mélange de silice, de sulfate de fer et de calcium. Le solstice d'été arrive le 21 mai 2009 au Sol 1914, et le rover entame le magnifique panorama couleur « Calypso » entre les Sols 1906 et 1943 (Figure 102), soit du 14 mai jusqu'au 20 juin 2009. Sur le cliché de la figure 102 composée d'une mosaïque d'une centaine d'images, le nord se trouve au centre de l'image et le sud vers ses deux extrémités. On peut voir sur l'image à partir de la droite en allant vers la gauche : « Von Braun », le flanc ouest du plateau « Home Plate », le sommet de« Husband Hill », « Ulysse » et « Tsiolkovsky » à gauche. Les traces du rover sur le côté droit

Figure 100 : Ulysse au Sol 1892 (Crédit : NASA/JPL-Caltech/Cornell)

Figure 101 : Ulysse au Sol 1899 (Crédit : NASA/JPL-Caltech)

sont plus profondes que sur le côté gauche à cause de la conduite en marche arrière et de la roue avant droite qui traîne sur le sol. La vue avant devient donc la vue arrière par rapport au sens de déplacement du robot sur le sol martien. Après plusieurs épisodes de rafales de vent qui ont nettoyé les panneaux solaires du rover, la puissance électrique est montée progressivement au-dessus des 900 watts/heure à partir du Sol 1941, avec un pic à 945 watts/heure sur le Sol 1946 (23 juin), avant de redescendre sous les 900 watts/heure à partir du Sol 1994 (12 août).

Figure 102 : Panorama Calypso (Crédit : NASA/JPL-Caltech/Cornell University)

Entre temps, l'astromobile va réussir à photographier les derniers « Dust Devils » en pleine action aux Sols 1919, 1953, 1968 et 1982, et utiliser son outil d'abrasion RAT pour creuser les deux derniers trous dans le sol martien situés entre les traces de roues du rover. Il s'agit de la cible baptisée « Cyclops_Eye » brossé et nettoyé au 1965, puis creusé sur les Sols 1973 et 1990. La deuxième cible est « Polyphemus_Eye » creusée aux Sols 1981 et 1995 (Figure 103). Les dernières activités de la RAT sont pour nettoyer la surface de la cible « Spear » au Sol 2006 qui se trouve dans la partie supérieure de « Ulysses », et un test de diagnostic observationnel sur la cible « Olive Leaf » au Sol 2016. Le rover fête sa troisième année martienne au Sol 2006 le 24 août 2009. Les conditions atmosphériques se sont par la suite détériorées davantage à l'approche d'une grande tempête régionale de poussières à partir du Sol 2001, où la production d'énergie a baissé jusqu'à 322 watts/heure au Sol 2007 pour finalement se stabiliser vers les 410 watts/heure par la suite. Spirit éprouve de nouveau des problèmes de réinitialisation et de mémoire flash aux Sols 2065, 2067 et 2069, soit deux jours avant l'arrivée de l'équinoxe d'automne sur le Sol 2067 le 26 octobre 2009. Le robot doit donc rester éveillé jusqu'à son relais de communication de l'après-midi avec la sonde orbitale Mars Odyssey pour renvoyer les données avant de faire la sieste. Les premières tentatives d'extractions du rover commencent le 6 novembre (Sol 2078), et Spirit déplace ses roues pour la première fois depuis 6 mois au Sol 2078. Le reformatage du

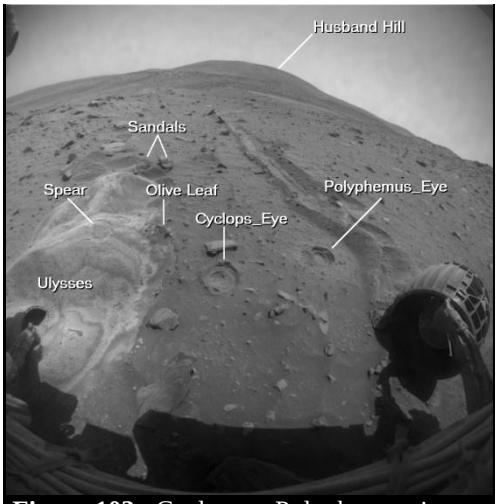


Figure 103 : Cyclops et Polyphemus, image caméa d'évitement d'obstacle avant Sol 2072 (Crédit : NASA/JPL-Clatech)

système de fichiers de mémoire flash est effectué sur le Sol 2083 (11 novembre 2009), et le rover utilise à nouveau le système de fichiers flash non volatile pour le stockage des données et de télémétrie. La première série de mouvements commandée débute cinq jours plus tard sur le Sol 2088 le 17 novembre 2009, et les manœuvres de dégagement sont effectuées en marche avant afin de profiter de la traction des roues du côté droit du rover. Le 28 novembre sur le Sol 2099, Spirit éprouve des problèmes avec sa roue arrière droite qui est désormais défectueuse et hors d'usage, les manœuvres d'extraction sur le terrain sont arrêtées quelque temps pour faire des diagnostics. La roue arrière droite avait déjà donné des signes de faiblesse au Sol 1837 (25 mars). Pour mieux comprendre ce qui est arrivé, une série de tests sur la roue avant droite est menée le 14 décembre au Sol 2115, et qui est hors service depuis le 13 mars 2006 (Sol 779). Durant les manœuvres, la roue avant droite a redonné pour la première fois des signes de vie durant quelques secondes avant de se taire à nouveau. Il ne reste plus qu'une seule roue en bon état de marche sur le côté droit du rover, soit la roue du centre, et l'extraction de Spirit avant l'arrivée de l'hiver semble de plus en plus impossible.

Une deuxième série de manœuvres d'extraction en marche avant commence sur le Sol 2117, et encore une fois la roue avant droite redonne pour la dernière fois des signes de vie durant quelques secondes, tandis que la roue arrière droite reste silencieuse. Spirit fête son sixième anniversaire à la surface de la planète Mars sur le Sol 2135 le 4 janvier 2010, et deux semaines plus tard, la deuxième série de manœuvres d'extractions en marche avant ne donne toujours pas de résultats significatifs. La décision fut prise au Sol 2145 le 14 janvier 2010, de tester une nouvelle série de manœuvres d'extraction qui sera effectuée cette fois-ci en marche arrière dans l'espoir de dégager Spirit avant que le pouvoir électrique ne tombe en dessous des niveaux capables de soutenir la conduite. La marche arrière montre des résultats positifs dès les premières tentatives d'extractions, mais les manœuvres doivent être abandonnées deux semaines plus tard sur le Sol 2158 le 27 janvier, à cause d'une chute plus importante que prévu de la puissance électrique qui est passé de 211 watts/heure à seulement 188 watts/heure. Il est maintenant temps de placer le rover dans une position qui lui serait le plus favorable orienté vers le soleil, afin de le préparer à passer à travers son quatrième hiver qui s'annonce déjà très difficile. Chaque degré d'inclinaison supplémentaire vers le nord en direction du soleil, améliore la production d'énergie quotidienne d'environ cinq watts/heure. Le dernier mouvement du rover sur le sol martien s'est effectué sur le Sol 2169 (8 février). Et depuis les dix derniers Sols, Spirit s'est déplacé de 34 centimètres en marche arrière à comparer aux 3,5 cm durant toutes les tentatives d'extraction en marche avant. L'inclinaison du rover est passée de 4 à 9,25 degrés vers le sud, et le robot se trouve désormais dans une position très défavorable pour capter la lumière solaire.

Le bilan d'énergie continue à baisser dangereusement au Sol 2191 (2 mars) passant à 153 watts/heure. Et vu que le robot a besoin de 160 watts/heure au minimum pour communiquer avec la Terre, il a activé la semaine suivante ses procédures d'opération d'hiver qui se composent d'un plan simple de 7 Sols qui sera répété chaque semaine aussi longtemps que le permettra la

Figure 104 : Dernière photo de Spirit (Crédit : NASA/JPL/Cornell, coloré par nef601 un membre du forum UMSF (Unmanned Space Flight))

puissance électrique. Le plan de 7 Sols contient une fenêtre pour la réception des données de la Terre avec l'antenne à faible gain omnidirectionnelle (LGA), et une autre pour le transfert de données vers la terre avec l'antenne UHF omnidirectionnelle. L'activité minimale sur chaque sol est de vérifier l'état des batteries et de faire une mesure de l'opacité atmosphérique (facteur Tau). Spirit qui est le premier robot a démontré le rôle de l'eau sur Mars à besoin d'un minimum de 135 watts/heure pour passer à travers l'hiver martien, dont 40 watts/heure justes pour le chauffage de ses circuits intérieurs. Dès que ce niveau d'énergie sera atteint, le rover passera en mode hibernation qui est un mode de mise en veille prolongée. Le robot coupera alors toute communication avec la Terre, et il ne s'éveillera pas avant le printemps prochain qui est prévu pour le 13 novembre 2010, quand il y aura suffisamment d'ensoleillement et d'énergie pour recharger ses batteries. Sur le même Sol, Spirit prend et envoie vers la terre la dernière photo qui sera prise au cours de sa mission sur la planète Mars (Figure 104). Les tentatives de positionner le rover dans une meilleure inclinaison vers le soleil ayant échoué, l'astromobile a finalement activé le mode d'hibernation le 22 mars 2010 sur le Sol 2210. Spirit ne se réveillera qu'une seule fois par Sol (jour) pour vérifier l'état de la charge de ses batteries, et si la charge le permet le rover tentera alors de communiquer avec la Terre, sinon il retournera en sommeil jusqu'au lendemain.

Figure 105 : Spirit immobilisé à Troy (Crédit : Glen Nagle 2010 | Données brutes: NASA/JPL/Cornell University)

Neuf mois plus tard, à la fin du mois de décembre 2010, le rover Spirit n'avait toujours pas donné de signes de vie. Ce silence radio indiquait clairement que le robot était bel et bien hors service depuis le 22 mars 2010, soit tout juste 52 jours avant l'arrivée du quatrième solstice d'hiver, et à seulement 37 Sols avant de battre le record de longévité de Viking 1. Les dernières tentatives de communication n'ayant rien donné, la mission fut officiellement déclarée perdue le 25 mai 2011. Spirit a envoyé 124 839 images et a parcouru 7 730,50 mètres à la surface de la planète Mars en 6 ans 2 mois et 19 jours, soit plus de 25 fois la durée prévue initialement, dont plus du deux tiers de sa mission, soit 4 ans et 22 jours à explorer les environs immédiat du plateau « Home Plate » (Figure 106). Le petit robot a dépassé toutes les attentes avec une durée et une distance parcourue à la surface de la planète Mars qui sont vingt-cinq fois et treize fois supérieures à celles qui avaient été initialement prévues pour toute la durée de la mission. L'ensablement de ses roues dans le sable fin de « Ulysse » aura finalement mis fin à la mission de Spirit sur Mars. Une représentation artistique de Glen Nagle (Figure 105), fait à partir des images brutes (RAW) de la NASA, illustre la dernière position approximative du robot à « Troy » situé à la base du versant ouest du plateau « Home Plate », où l'on peut voir au loin derrière le rover la petite colline « Van Braun » vers lequel se dirigeait le rover avant de rester définitivement coincé, enlisé à jamais dans le sable fin du cratère « Gusev ».

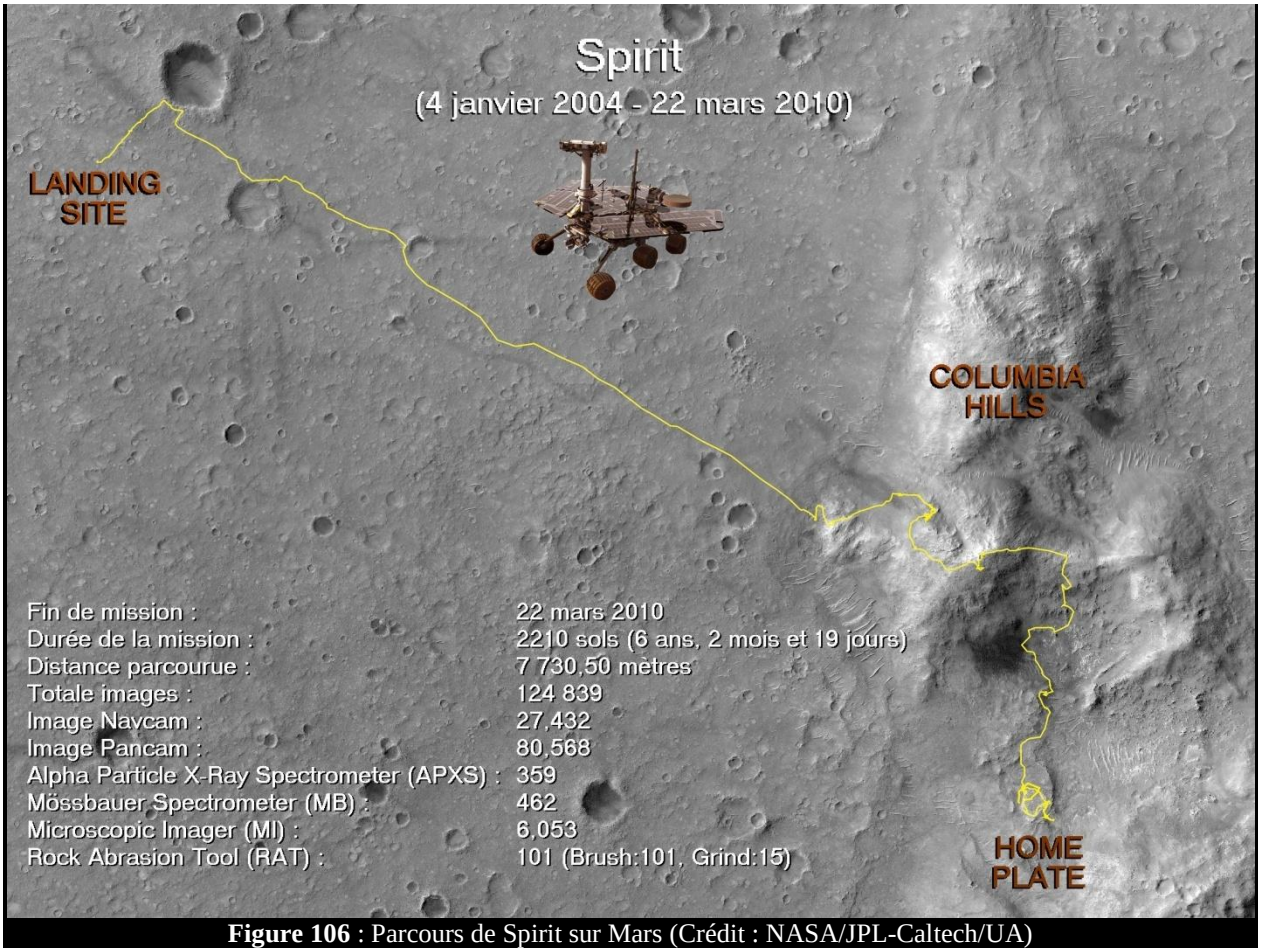


Figure 106 : Parcours de Spirit sur Mars (Crédit : NASA/JPL-Caltech/UA)

Pour aller plus loin:

- "Overview of the Spirit Mars Exploration Rover Mission to Gusev Crater: Landing site to Backstay Rock in the Columbia Hills", l'American Geophysical Union, 06 January 2006.

- "Spirit Mars Rover Mission to the Columbia Hills, Gusev Crater: Mission overview and selected results from the Cumberland Ridge to Home Plate", l'American Geophysical Union, 06 November 2008.

- Iron mineralogy and aqueous alteration from Husband Hill through Home Plate at Gusev Crater, Mars: Results from the Mössbauer instrument on the Spirit Mars Exploration Rover, 23 December 2008

- "Spirit Mars Rover Mission: Overview and selected results from the northern Home Plate Winter Haven to the side of Scamander crater", l'American Geophysical Union, 30 September 2010.

Lien pour les Cartes plus détaillé du trajet de Spirit sur Mars :

Sol 1-800 de Phil Stooke
https://umsfarchive.com/index.php/viewtopic.php?p=49444#p49444
Sol 743-1871 d'Eduardo Tesheiner (April 8, 2009)
https://www.planetary.org/articles/08-31-mer-update-4
Sol 743-1868 d'Eduardo Tesheiner (April 5, 2009)
https://umsfarchive.com/index.php/viewtopic.php?p=138774#p138774

LES PANORAMIQUES D'OPPORTUNITY

Figure 1 : Lancement d'Opportunity (Crédit : NASA)

La sonde Opportunity (MER-B) a été lancée du Cap Canaveral en Floride le 7 juillet 2003 à 3h18 UTC (temps universel coordonné) par une fusée de type Delta II H (Figure 1). Après un long voyage dans l'espace de plus de 456 millions de kilomètres parcourus en 6 mois et demi. Le module d'atterrissage d'Opportunity se pose avec succès à la surface de la planète Mars le 24 janvier 2004 à 4h54; soit tout juste trois semaines après l'atterrissage réussi de Spirit (MER-A) qui se trouve de l'autre côté de la planète dans le cratère « Gusev » à plus de 9 670 kilomètres de distance. Après avoir effectué une chute libre de six minutes dans l'atmosphère martienne, durant laquelle aucune communication radio n'est possible. Le module d'atterrissage protégé par ses 24 airbags percute le sol de la planète, et bondit plus de 26 fois sur une distance d'environ 200 mètres avant de s'immobiliser définitivement au fond du petit cratère « Eagle ». Le site d'atterrissage d'Opportunity est situé près de l'équateur à 1,95° de latitude Sud par 5,53° de longitude Ouest dans la vaste plaine volcanique de « Meridiani Planum ». Cette plaine désertique de couleur sombre a été sélectionnée à l'origine à cause de sa forte concentration en hématite grise, qui a été détectée pour la première fois en 1998 par le spectromètre d'émission thermique (TES) de la sonde Mars Global Surveyor (MGS).

L'hématite (Fe_2O_3) qui compose la fine couche de poussière rouge qui recouvre en grande partie la surface de la planète sur quelques micromètres d'épaisseur, est en réalité un minéral d'oxyde de fer anhydre très stable formé à partir de réaction chimique d'oxydation. Les superoxydes (H_2O_2) produits par l'activité photochimique du rayonnement ultraviolet solaire sur des molécules d'eau de l'atmosphère martienne, finissent avec le temps par oxyder la surface des roches basaltiques pour former de l'hématite. Ce processus d'oxydation contribue également au dessèchement de l'atmosphère peu dense de la planète, ce qui favorise à la longue un milieu très sec et aride. Contrairement à l'hématite rouge (rouille) composée de grains microscopiques ou fins, l'hématite grise à gros grains (ou cristalline) est présente sous forme de grand dépôt localisé à seulement trois endroits à la surface de Mars (« Valles Marineris », le cratère « Aram Chaos » de 280 km de diamètre et « Meridiani Planum »), donnant l'impression que ses dépôts sédimentaires sont très vieux et qu'ils se seraient formés à partir de minéraux en solution riche en fer à l'époque où Mars était plus humide et beaucoup plus active, comme à l'époque de l'ouverture de l'énorme vallée « Valles Marineris » au Theiikien.

L'hématite grise est un minéral d'origine sédimentaire composée de gros-grains de quelques millimètres de diamètres de forme ronde formée par concrétions à partir d'une amorce

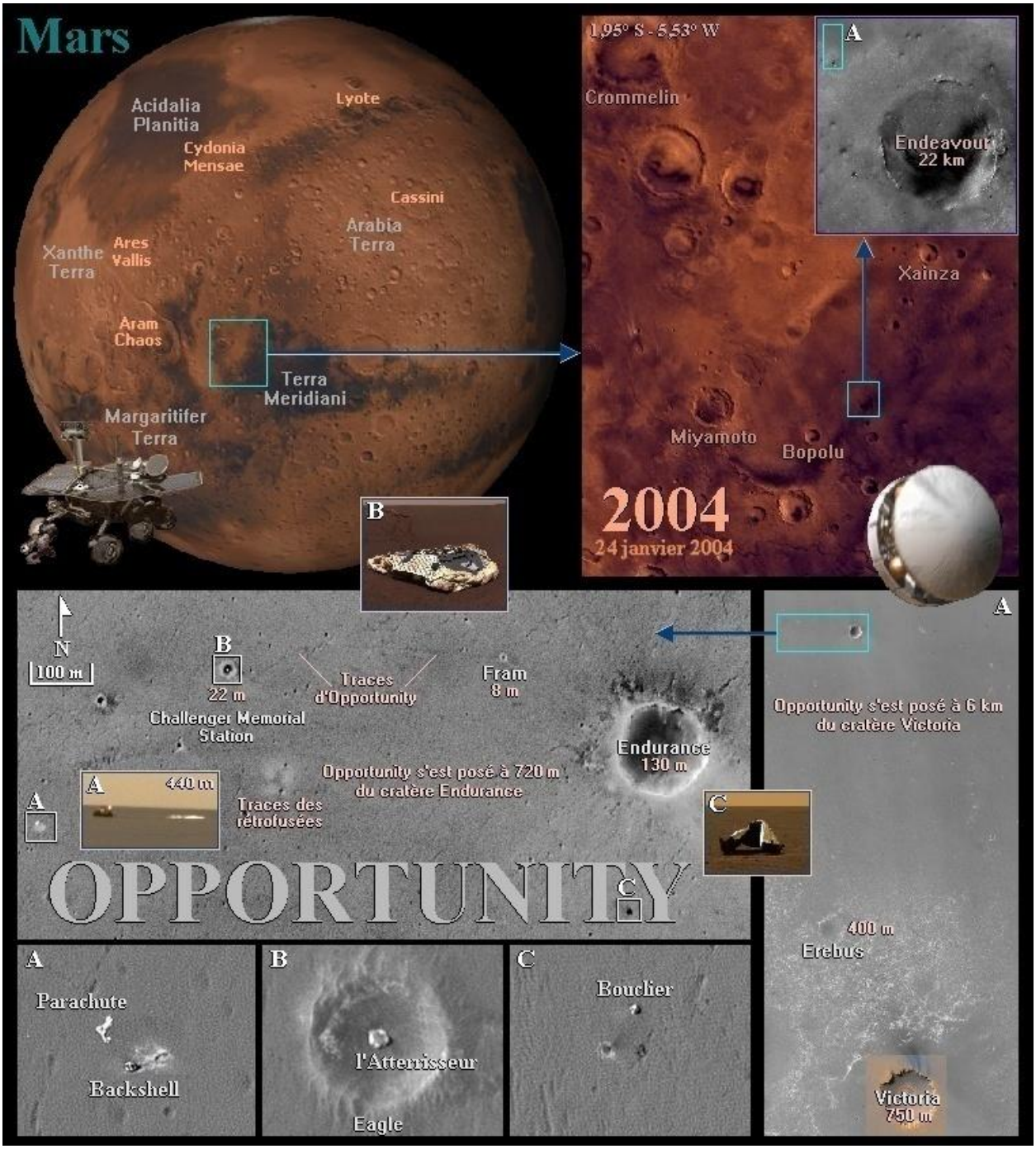


Planche 1 : Le site d'atterrissage d'Opportunity obtenu grâce aux données fournies par la caméra MOC en mode cPROTO de Mars Global Surveyor (MGS) le 26 avril 2004 (la photo du centre à gauche). Les photos du bas à gauche et à droite sont de la caméra Hirise de Mars Reconnaissance Orbiter (MRO) prise le 21 et le 29 novembre 2006. La photo du cratère Endeavour en haut à droite est de la caméra Thermis de Mars Odyssey. Les 2 photos du haut ayant participé au montage de cette maquette proviennent des orbiteurs Vikings.

en milieux humides, comme l'exemple des myrtilles ou blueberries qui sera observé plus tard par Opportunity. Il peut s'agir d'étendue d'eau peu profonde si la présence de sel est détectée, ou d'une activité volcanique de type hydrothermal si l'hématite a été précipitée à travers les fissures et les pores des roches. La chute de gros météorite, d'astéroïde ou de comète, peut aussi expliquer

Planche 2 : Carte du trajet d'Opportunity entre les Sols 1 et 57. La photo d'arrière-plan a été obtenue grâce aux données fournies par la caméra Hirise de Mars Reconnaissance Orbiter (MRO) le 14 novembre 2006. Position et trajet du rover guidé par les cartes de la NASA et de Eduardo Tesheiner.

la présence de l'eau de manière périodique à la surface de la planète Mars. L'onde de choc créée lors de la collision brasse et réchauffe le sol qui fait fondre la glace qui est enfouie, faisant remonter et jaillir l'eau à la surface par hydrothermalisme pendant un certain temps, avant que l'eau ne disparaisse à nouveau dans le sol ou dans l'atmosphère de la planète par évaporation et sublimation, laissant derrière elle des boues qui se transforment en dépôts d'évaporites. L'hématite peut également se former à haute température sans la présence d'eau lors d'activité

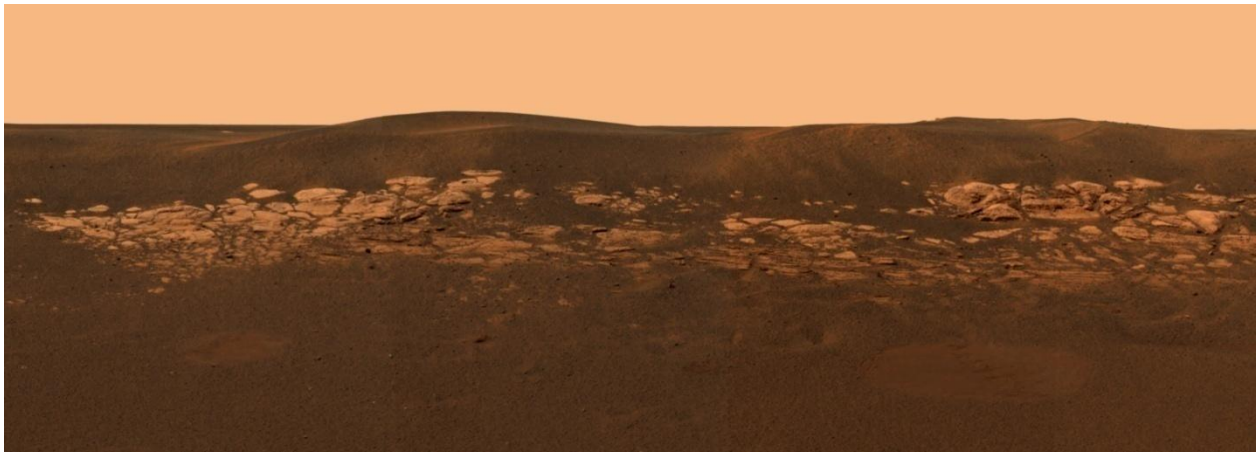


Planche 3 : Le premier panorama couleur d'Opportunity (Crédit : NASA/JPL/Cornell)

volcanique, elles se forment alors à partir de l'oxydation thermique de la magnétite (Fe_3O_4) qui est un minéral d'oxyde de fer d'origine basaltique, les grains sont alors de forme cristalline et ils sont incorporés dans la composition des roches volcaniques. Des sphères de matériaux basaltiques peuvent également se former lors d'éruptions volcaniques ou lors d'un impact météoritique, qui pulvérise et expulse dans les aires une très grande quantité de gouttelettes de roche en fusion qui se refroidit rapidement en retombant à la surface. La présence d'hématite grise et des sels de type évaporite sous forme de dépôt, suggèrent très fortement la présence de l'écoulement d'une faible quantité d'eau à la surface de la planète dans le passé, qui aurait favorisé la formation des dépôts par la précipitation des sulfates et des oxydes de fer en solution aqueuse, avant que l'eau ne disparaisse de la surface par évaporation et sublimation. Deux ans plus tard, des images obtenues par le spectromètre infrarouge OMEGA de l'orbiteur Mars Express en 2005, ont montré que le rover Opportunity s'était posé à seulement 400 km au sud-ouest d'un vaste dépôt sédimentaire de sulfate hydraté.

Opportunity s'est posé à douze kilomètres au nord-ouest du grand cratère d'impact « Endeavour » de 22 kilomètres de diamètre sur près de 300 mètres de profondeur, et à 720 mètres à l'ouest du petit cratère d'impact « Endurance » de 130 mètres de diamètre sur 20 mètres de profondeur (Planche 1). Les premières images arrivent quatre heures plus tard le même jour (Figure 2), et dévoilent une surface surprenante autour du site d'atterrissage qui est recouvert d'une couche de poussière sombre, avec des affleurements rocheux sédimentaire plus claire qui semblent transpercer la surface du sol martien. Un paysage qui est très différent de ceux qui ont

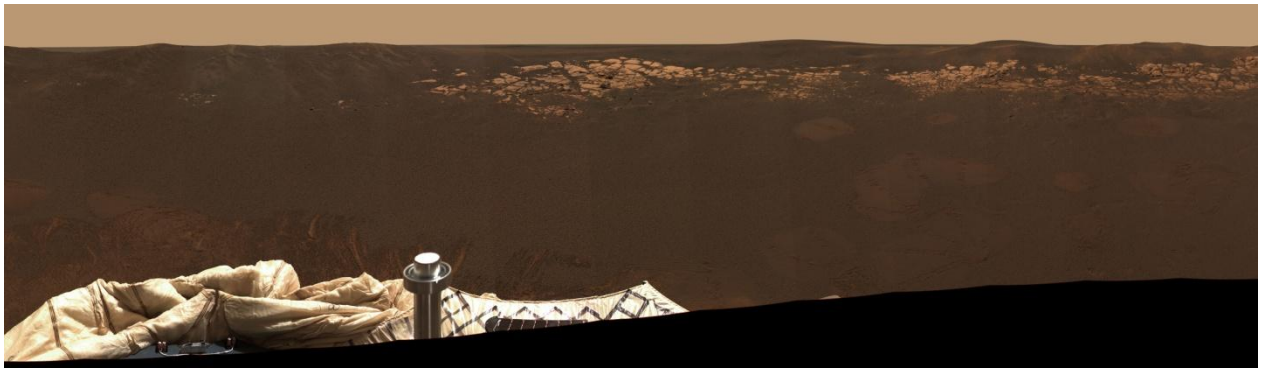


Planche 4 : Cratère Eagle (Crédit : NASA/JPL/Cornell)

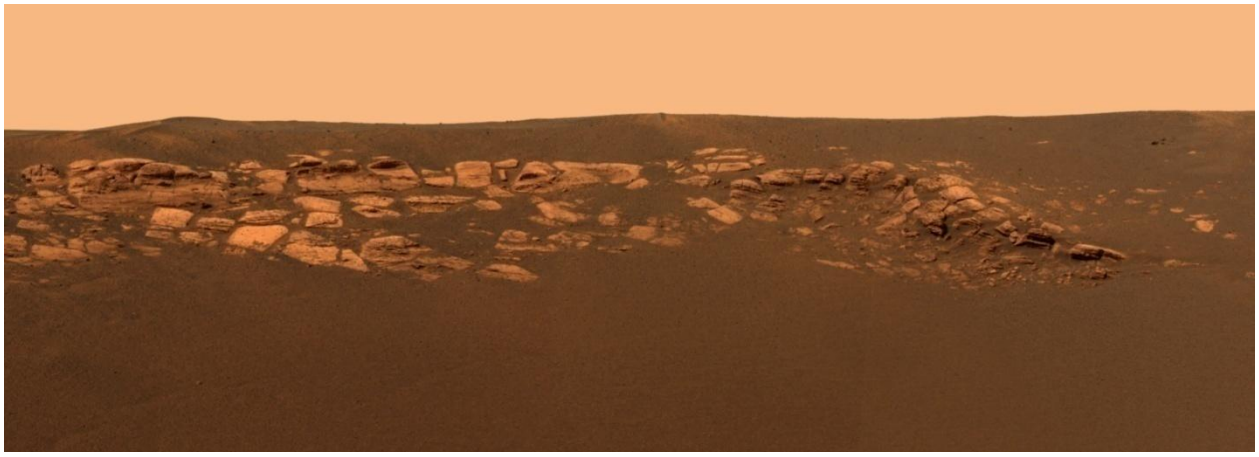


Planche 3 : Suite du premier panorama couleur.

été observés jusqu’à présent dans les sites d’atterrissages des missions Vikings, Pathfinder et Spirit, et qui présentait une surface recouverte d’une fine couche de poussière rouge avec un très grand nombre de roches de grosseurs différentes éparpillées un peu partout sur le sol martien (éjectas).

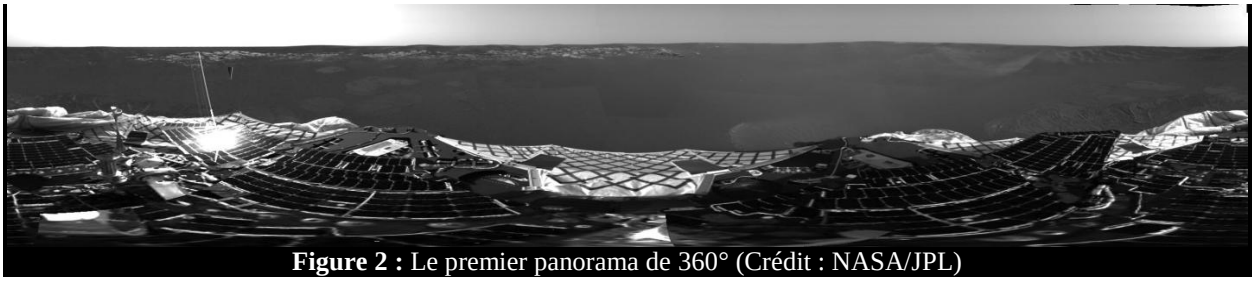


Figure 2 : Le premier panorama de 360° (Crédit : NASA/JPL)

Opportunity a eu une chance extraordinaire de se poser au fond du petit cratère « Eagle », de 22 mètres de diamètres sur près de deux mètres de profondeur, avec en prime des affleurements rocheux de teinte claire qui jaillit du sol à moins de dix mètres à l’ouest du module d’atterrissage. Des affleurements rocheux composés de différentes strates sédimentaires qui semblent bien avoir été créés par l’action érosive de l’eau dans le passé de la planète. Sur le premier cliché panoramique en noir et blanc de 360° pris sur le Sol 1 (Figure 2), et sur le cliché panoramique couleur qui a été pris trois jours plus tard sur le Sol 4 (Planche 3). On peut voir les affleurements rocheux qui bordent le flanc intérieur nord-ouest du cratère « Eagle », avec des

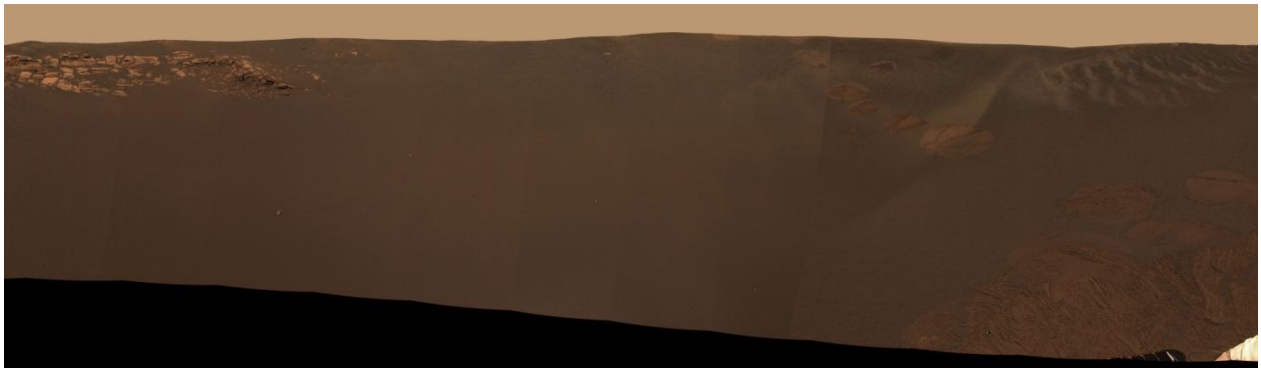


Planche 4 : Suite du cratère Eagle.

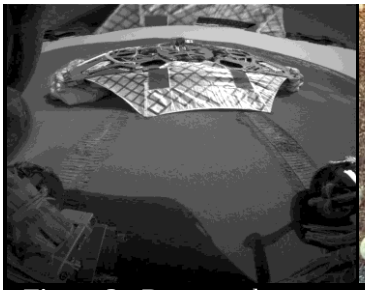


Figure 3 : Descente du rover (Crédit : NASA/JPL)

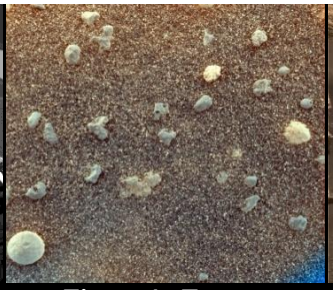


Figure 4 : Tarmac (Crédit : NASA/JPL/USGS)

Figure 5 : Stone Mountain (Crédit : NASA/JPL/Cornell)

milliers de petites sphères claires qui parsèment le sol du paysage. Les empreintes des airbags laissés au sol par les derniers rebonds du module d'atterrissage sont également visibles sur les images, et ils indiquent clairement que le robot a fait son entrée dans le cratère par le côté Est (voir l'image de droite de la Planche 4). La première semaine de la mission sera entièrement consacrée au bon déploiement du rover Opportunity sur sa plate-forme d'atterrissage.

Sur le Sol 6 (30 janvier), l'astromobile prend un cliché panoramique couleur de 360° composé d'une mosaïque de 225 images prises à l'aide de trois filtres de couleurs différents (Planche 4). Le cliché de haute définition de la PANCAM dévoile encore une fois le magnifique paysage intérieur du cratère « Eagle » et de ses environs. Les analyses infrarouges du cratère effectué le même jour par le spectromètre miniature à émission thermique (Mini-TES), ont dévoilé la présence d'hématite tout autour des affleurements rocheux de teinte claire, qui ont été baptisé pour l'occasion « Opportunity Ledge », tandis que le spectromètre Mössbauer découvre la signature de l'olivine dans le sol. L'olivine (Fe_2SiO_4) est un silicate de fer qui rentre dans la composition minérale de certaines roches basaltiques d'origines volcaniques, et qui peut également se retrouver sous forme de silicate de magnésium (Mg_2SiO_4). Il s'agit d'un minéral qui est très instable en présence d'eau, et qui peut à l'occasion donner de la maghémite, de la goethite (qui a été découvert par Spirit), ou encore de l'hématite. Le module d'atterrissage d'Opportunity a été rebaptisé « Challenger Memorial Station » en l'honneur de la tragédie de la navette spatiale Challenger, qui s'est désintégrée peu de temps après son décollage le 28 janvier 1986. Après avoir réalisé différents tests sur les instruments scientifiques du rover, il est maintenant temps pour Opportunity de quitter la plate-forme d'atterrissage et de poursuivre sa mission de géologues sur le sol martien. Le lendemain matin au Sol 7 à 3h02 heure local de Mars (LMST), l'astromobile Opportunity quitte définitivement sa plate-forme d'atterrissage pour descendre sur le sol martien par la rampe de sortie avant (Figure 3), puis le robot parcourt une courte distance de trois mètres vers le nord-est avant de s'arrêter pour quelques jours; le temps d'étudier plus en détail le sol martien qui se trouve à ses pieds.

Opportunity entame au Sol 10 une série d'analyse complète d'une cible sur le sol baptisée « Tarmac » qui est située juste au pied de la plate-forme d'atterrissage. L'image prise par la caméra d'imagerie microscopique (MI) montre des grains qui sont de grosseurs, de formes et de couleurs différentes entourées d'une fine couche de poussière plus sombre (Figure 4). Ce qui semble vouloir indiquer que les grains que l'érosion éolienne a dégagés des roches auraient une origine différente. Les grains pourraient avoir une origine météoritique, ou volcanique s'ils présentent des aspects vitreux, ou encore sédimentaires s'ils ont été formés par concrétion minérale en milieu aqueux. Le plus gros grain qui se trouve en bas à gauche sur la figure 4, est une boule sphérique qui mesure environ 3 mm de diamètre. Par la suite, Opportunity poursuit

sa route vers le nord-est en direction de l'affleurement rocheux « Stone Mountain » (Montagne en pierre) qui est situé huit mètres plus loin, et que le rover atteindra au Sol 12 le 5 février (Figure 5). Il s'agit de l'une des plus proches strates rocheuses qui se trouvent à l'extrémité nord-est de l'affleurement principal « Opportunity Ledge » qui borde tout le flanc intérieur nord-ouest du cratère. Au Sol 13, le rover prend des images d'une cible qui se trouve sur le sol avec l'imageur microscopique (MI), et découvre à l'intérieur des petites sphérules grises de 2 à 3 mm de diamètre (Figure 6), que l'érosion éolienne semble avoir dégagés des roches aux alentours. Les petites sphérules grises ont été baptisées myrtilles ou blueberries (baies bleues), et elles sont distribuées en très grand nombre à la surface du sol et sur les roches ; il s'agit de petite bille composée en grande partie d'hématite cristalline. Le lendemain sur le Sol 15, Opportunity photographie la cible « Robert E » qui se trouve sur « Stone Mountain », et découvre d'autres myrtilles à la surface de la roche (Figure 6).

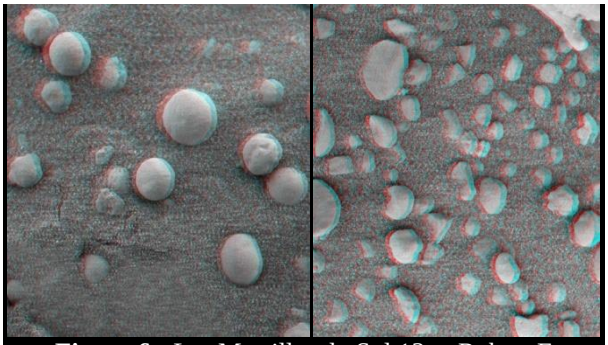


Figure 6 : Les Myrtilles du Sol 13 et Robert E (Crédit : NASA/JPL/Cornell/USGS & Texas A&M)

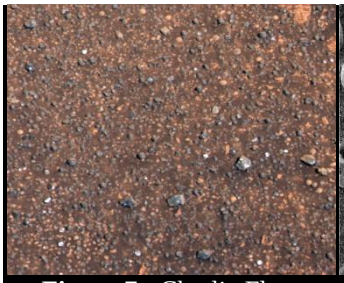


Figure 7 : Charlie Flats (Crédit : NASA/JPL/Cornell)

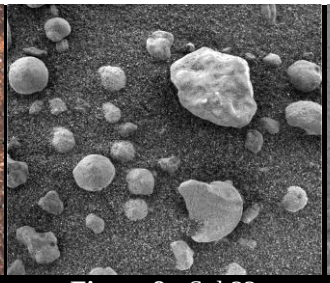


Figure 8 : Sol 22 (Crédit : NASA/JPL/USGA)

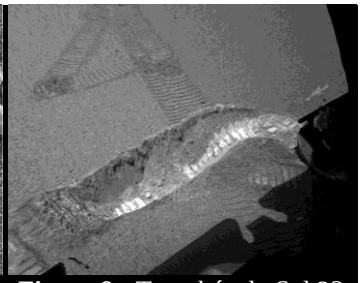


Figure 9 : Tranchée du Sol 23 (Crédit : NASA/JPL/AMES)

L'astromobile se dirige ensuite vers le sud-ouest au Sol 16 (9 février), afin de rejoindre une cible sur le sol baptisée « Charlie Flats » (Figure 7) que le robot va rejoindre trois jours plus tard sur le Sol 19. Le rover entreprend aussitôt une nouvelle série d'analyse du sol à cet endroit, qui semble riche en hématite. Puis, Opportunity reprend la route au Sol 21 en direction cette fois-ci de l'extrémité sud-ouest de l'affleurement rocheux « Opportunity Ledge », et rencontre neuf mètres plus loin au Sol suivant une nouvelle cible sur le sol qui semble très riche en hématite (Figure 8). Le lendemain, le rover effectue des mesures conjointes de l'atmosphère martienne avec la sonde orbitale Mars Global Surveyor (MGS), qui utilise pour l'occasion son spectromètre infrarouge (TES) pointé vers le bas et Opportunity utilise son spectromètre à émission thermique (Mini-TES) pointé vers le haut. Sur le Sol 23 le 16 février 2004, l'astromobile bloque cinq de ses roues motrices pour faire patiner sa roue avant droite, dans le but de creuser une tranchée sur le sol martien de 50 cm de long sur 20 cm de large et par 9 cm de profondeur (Figure 9). Opportunity étudie la tranchée jusqu'au Sol 26 (19 février), et le spectromètre infrarouge Mini-TES découvre à l'intérieur de l'hématite sous forme cristalline qui tapisse les murs et le plancher de la tranchée.

Après avoir complété une étude de quatre jours de la tranchée et de ses environs, le rover Opportunity revient sur ses pas au Sol 26 en direction du nord-est, et parcourt une distance de

Figure 10 : L'affleurement rocheux El Capitan
(Crédit : NASA/JPL/Cornell)

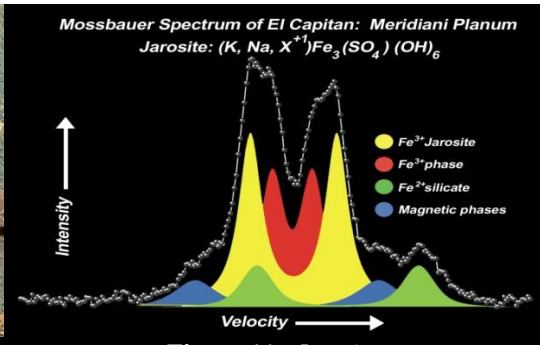


Figure 11 : Jarosite
(Crédit : NASA/JPL/University of Mainz)

quinze mètres avant de rejoindre le plus gros bloc rocheux de l'affleurement « Opportunity Ledge » baptisé « El Capitan » (Figure 10). Le robot profite de l'occasion pour s'arrêter une dizaine de jours, le temps de faire une série d'analyse très complète de l'affleurement « El Capitan » jusqu'au Sol 37. Opportunity utilise pour la première fois son outil d'abrasion RAT sur le Sol 30 (24 février), pour creuser un trou de 4,5 cm de diamètre sur 4 mm de profondeur sur la cible « McKittrick » qui se trouve à la base de « El Capitan ». Le rover photographie le résultat du forage avec son microscope électronique, et effectue par la suite une série d'analyse avec ses autres instruments, incluant une longue intégration de 24 heures du spectromètre Mössbauer. On peut voir sur certaines images prises par le microscope électronique, des sphérules qui semblent avoir poussé sur place à l'intérieur de la roche (Figure 10:a, b et d), et sur d'autres images on peut voir des sphérules qui ont été sciées en deux par les rotors de la RAT (Figure 10:d) lors de la longue séance de brossage qui a duré deux heures. L'étude de l'affleurement « El Capitan » a dévoilé son origine sédimentaire, qui a incorporé des amorces de concrétion de bille d'hématite lors de sa croissance dans un milieu plus humide, et que l'érosion éolienne a libérée par la suite.

Figure 12 : Bouclier et Parachute
(Crédit : NASA/JPL/Cornell)

Figure 13 a : Last Chance

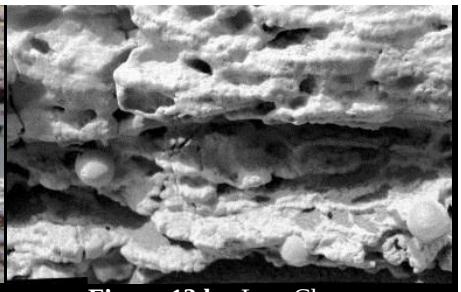


Figure 13 b : Last Chance
(Crédit : NASA/JPL-Caltech/Cornell)

Le spectromètre à rayon X et alpha (APXS), qui irradie ses cibles avec des rayons X ou des particules alpha (atome d'hélium) à partir d'une source radioactive de curium 244 qui a une durée de demi-vie de 18 ans, et qui analyse par la suite le rayonnement X ou alpha qui sont émis par les échantillons irradiés. A dévoilé la présence de chlore, de brome et de soufre, tandis que le spectromètre Mössbauer a détecté une forte concentration de jarosite ($NaFe_3(SO_4)_2(OH)_6$) lors de sa longue intégration de 24 heures. La jarosite est un sulfate de fer hydraté (Figure 11) qui se forme en milieu humide un peu acide à partir de l'oxydation des sulfures de fer comme la pyrite (FeS_2), mais qui peut se transformer rapidement en goethite en présence d'humidité. La présence de jarosite sur le site d'atterrissage d'Opportunity semble vouloir indiquer que ce minéral s'est formé très rapidement dans un milieu plus humide (bassin de rétention) et faiblement acid

Figure 14 : Le cratère Endurance sur l'horizon (Crédit : NASA/JPL/Cornell)

durant une courte période de temps, avant que cette région de la planète redevienne plus sèche et aride, afin d'éviter à la jarosite de s'hydrater et de se transformer en goethite (α-$Fe_3O(OH)$).

Le rover qui est présentement près du sommet de la crête nord du cratère « Eagle », jette un petit coût d'œil par-dessus au Sol 32 (25 février), et tourne son regard vers l'est en direction du cratère « Endurance » pour prendre une photo du paysage martien des alentours donnant sur la vaste plaine environnante de « Meridiani Planum » (Figure 14). Dans la partie gauche de l'image, on peut apercevoir la crête ouest du cratère « Endurance » qui se trouve à plus de 720 mètres de distance. Et un peu plus loin vers la droite, on peut voir au loin sur la ligne d'horizon le bouclier arrière (Back Shell) et le parachute qui sont étendus sur le sol à environ 440 mètres de distance. La figure 12 montre un zoom sur le bouclier arrière et le parachute qui a été extrait de la figure 14, et que l'astromobile avait aperçu pour la première fois sur le Sol 9 de la mission. Vers le centre de l'image de la figure 14, on peut apercevoir la petite roche « Bounce » qui est située tout juste au-dessus du rebord Est du cratère, à l'endroit même ou le module d'atterrissage à laisser ses dernières empreintes d'airbags avant de tomber dans le cratère « Eagle ». Opportunity entame à partir du Sol 33, un vaste panorama en noir et blanc de 360° qui dévoile l'intérieur du cratère « Eagle », et qu'il finira de cadrer sur les Sols 35 et 36 (Figure 15). Le rover entreprend par la suite au Sol suivant une nouvelle série d'analyse complète de la cible « Guadalupe » qui se trouve dans la partie supérieure de l'affleurement rocheux « El Capitan », ou le rover aura l'occasion d'utiliser pour une deuxième fois son outil d'abrasion RAT au Sol 34 pour polir et nettoyer la surface de la roche avant de faire une étude plus complète.

Figure 15 : Cratère Eagle pris à la hauteur de El Capitan (Crédit : NASA/JPL/Cornell)

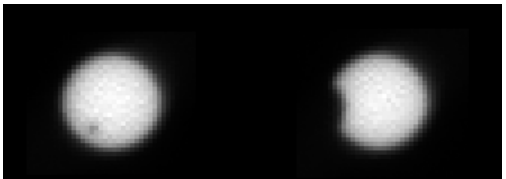


Figure 15 b : Transite de Phobos et Deimos (Crédit : NASA/JPL/Cornell)

Opportunity se déplace ensuite vers l'est au Sol 38 pour se diriger vers l'affleurement rocheux « Last Chance » (Figure 13:a), ou le robot se prépare a faire une nouvelle série d'analyse de plusieurs jours sur les cibles « Makar » et « Wave Ripple » (Figure 13:b). Le lendemain, l'astromobile observe le transit de la lune Deimos qui passe devant le disque solaire au Sol 39 le 4 mars (Figure 15b), et communique pour la première fois avec la sonde orbitale Mars Express de

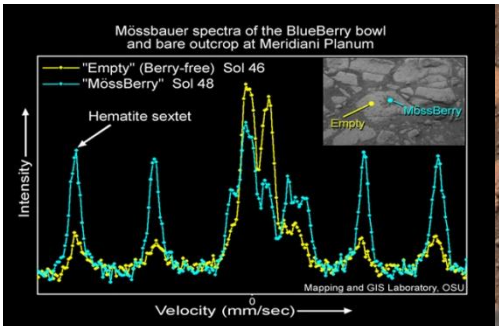


Figure 16 : Spectres de Berry Bowl (Crédit : NASA/JPL/University of Mainz)

Figure 17 : Berry Bowl (Crédit : NASA/JPL/Cornell)

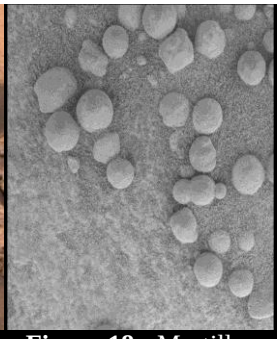


Figure 18 : Myrtilles (Crédit : NASA/JPL)

l'agence spatiale européenne (ESA), qui est en orbite autour de la planète Mars depuis décembre 2003. Le rover tourne le dos à « Last Chance » au Sol 41, pour se diriger dans la direction opposée vers le nord-ouest en longeant par le sud l'affleurement rocheux principal « Opportunity Ledge » jusqu'à l'emplacement baptisé « The Dells ». Rendu sur les lieux, Opportunity amorce l'étude du pavé d'affleurement « Flat Rock » en entamant une séance d'abrasion au Sol 44 sur la cible « Mojo2 ». La profondeur du trou sur « Mojo2 » atteindra 3,1 mm, et la surface est brossée au Sol suivant afin de présenter une surface propre aux différents instruments scientifiques du rover. L'astromobile en profite également pour observer et photographier son deuxième transit solaire, lors du passage de la lune Phobos devant le disque solaire au Sol 42 le 7 mars (Figure 15:b).

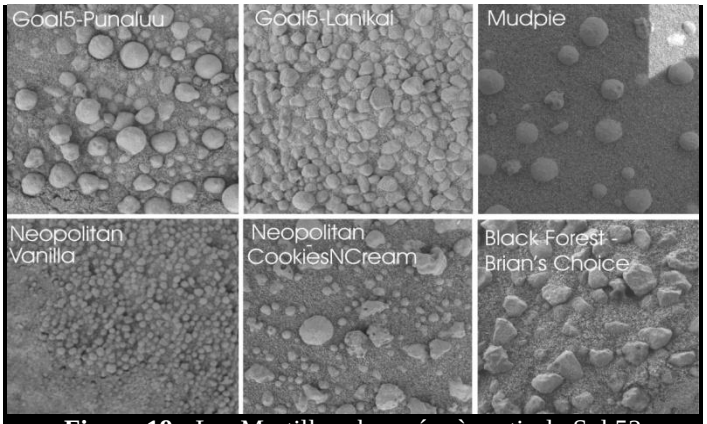
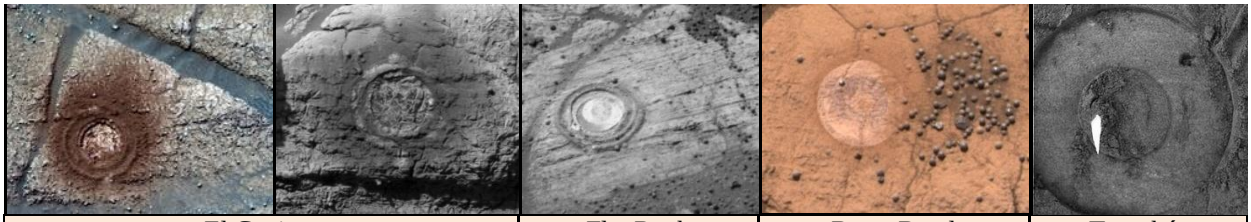


Figure 19 : Les Myrtilles observées à partir du Sol 52 (Crédit : NASA/JPL/Cornell/USGS)

Le rover Opportunity quitte la région « The Dells » au Sol 45 (10 mars), et entame du même coup la seconde moitié des 90 jours qui avait été initialement prévue pour la durée de sa mission sur Mars. L'astromobile arrive à proximité de « Berry Bowl » (*Bol de Baie*) au Sol 46 (Figure 17), et découvre une poignée de myrtilles étendues sur la roche avec la présence de fentes de dessiccations qui parcourent toute sa surface. Cet aspect de l'affleurement rocheux semble vouloir indiquer qu'il a subi dans le passé une alternance de période humide et sèche. Les analyses effectuées par le spectromètre Mössbauer, après avoir brossée la surface de la roche, indiquent une forte concentration d'hématite (Figure 16) dans la composition minérale des myrtilles qui recouvrent « Berry Bowl » (Figure 18). Opportunity reprend la route sur le Sol 48 pour se diriger vers l'extrémité sud-ouest de l'affleurement « Opportunity Ledge », et parcourt une distance de dix mètres avant de rejoindre la roche « Shark's Tooth » (*dent de requin*) au Sol 50 (14 mars), ou le rover analyse les cibles « Enamel 1 », « Lamination » et « Carousel ». L'astromobile recule de quelques mètres vers le centre du cratère au Sol 51, et parcourt ensuite un arc de quinze mètres vers le sud-est autour de la plate-forme d'atterrissage, dans le but d'aller étudier cinq cibles sur le sol qui se trouvent un peu plus loin (Punaloo, Lanikai, Neopolitan, Mudpie et Black Forest). Le rover étudie la première cible « Punaloo » sur le Sol 51 qui se trouve près du bord de la crête sud

Figure 20 : Panorama pris au Sol 57 à la sortie du cratère Eagle (Crédit : NASA/JPL)



El Capitan		Flat Rock	Berry Bowl	Tranchée
McKittrick Sol 30	Guadalupe Sol 34	Mojo 2 Sol 44	Sol 48	Sol 55

Figure 20 b : Activité de la Rat dans le cratère Eagle (Crédit : NASA/JPL)

du cratère, puis il se déplace de six mètres vers le nord au Sol suivant pour aller étudier la deuxième cible « Lanikai ». Au Sol 53, Opportunity parcourt une courte distance de cinq mètres pour étudier les échantillons de sol « Cookies And Cream » et « Vanilla », qui se trouvent dans la zone de la troisième cible « Neopolitan » (Figure 19). Puis c'est le tour de la quatrième cible dénommée « Mudpie » au Sol 54, avec l'étude des échantillons de sol « Ice Cream Man », « Chocolate Chip » et « Coconut ». Le rover en profite également pour creuser une nouvelle tranchée sur le Sol 55 (Figure 20:b), qui sera étudié plus tard au cours des Sols suivants.

Opportunity a parcouru une distance d'environ 115 mètres à la surface de la planète Mars entre les Sols 7 et 54, battant ainsi l'ancien record de 102 mètres du petit rebot Sojourner lors de la mission de Mars Pathfinder en 1997. Sur le Sol 56, l'astromobile effectue des analyses sur l'échantillon de sol « Brian's Choice » qui se trouve dans la zone de la cinquième cible « Black Forest » (Figure 19). Opportunity grimpe ensuite la pente de la crête sud du cratère, pour entamer un cliché panoramique avec une vue qui surplombe le paysage intérieur du cratère « Eagle » (Figure 20), et échoue le même jour sa première tentative pour sortir du cratère. Le rover parvient finalement à sortir du cratère « Eagle » le lendemain sur le Sol 57 (22 mars), et l'astromobile termine du même coup la première étape de sa mission d'exploration sur Mars, qui consistait à faire l'étude géologique autour du site d'atterrissage dans le but de trouver des indices minéralogique sur la présence passée et prolongée de l'écoulement de l'eau sur la planète. À partir du Sol 58, le rover entamera un sprint de 720 mètres à travers les plaines de « Meridiani Planum » qui le conduira tout droit vers sa deuxième cible géologique : le cratère d'impact « Endurance ».

EN ROUTE VERS ENDURANCE (Sol 58 à 320)

Opportunity poursuit sa mission d'exploration de la surface de la planète Mars à la sortie du cratère « Eagle », et se prépare à faire une longue randonnée de plus de 720 mètres à travers les plaines volcaniques de « Meridiani Planum » afin de pouvoir rejoindre le cratère « Endurance ». Le rover prend un panorama souvenir avec ses caméras de navigation en noir et blanc de 360° au Sol 58, qui dévoile le paysage désertique des plaines environnantes qui entourent le cratère « Eagle » (Figure 21). L'astromobile revient ensuite sur ses pas vers le rebord sud-est du cratère, où il entame jusqu'au Sol 60 le vaste panorama couleur « Lion King » (Planche 6), composé d'une mosaïque de 558 images prises à l'aide de trois filtres de couleur différents. On peut voir sur la ligne d'horizon dans la partie droite des images de la figure 21 et de la planche 6, la crête ouest du cratère « Endurance » et la roche « Bounce » qui est située juste en dessous. Avec un plus fort grossissement, on peut voir à droite du cratère « Endurance » le parachute et le bouclier arrière (Back Shell) qui se trouvent à plus de 440 mètres de distance. Sur l'image de droite du panorama « Lion King », on peut également apercevoir le versant Est du cratère « Eagle » par où la capsule d'atterrissage a fait son entrée le 24 janvier, il suffit pour cela de suivre les empreintes des derniers rebonds des airbags sur le sol martien, ou il est possible d'en compter jusqu'à 8 entre le cratère et l'horizon lointain de « Meridiani Planum ».

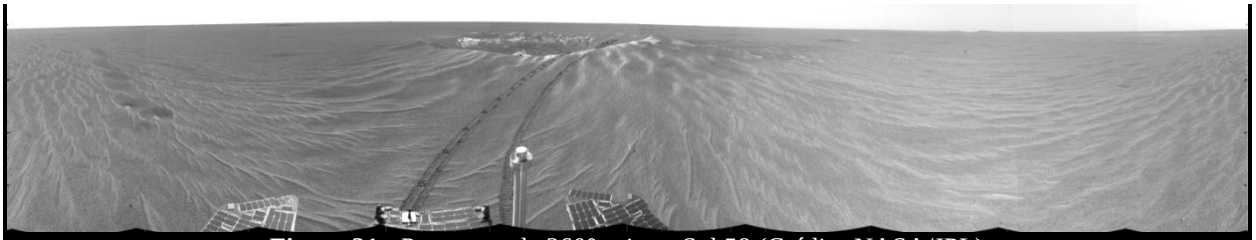


Figure 21 : Panorama de 360° pris au Sol 58 (Crédit : NASA/JPL)

Opportunity se remet en route vers le nord-est au Sol 61 en direction du cratère d'impact « Endurance ». Le rover rencontre sur sa route la roche « Bounce » (*Rebond*) au Sol 63 (29 mars), de la taille d'un ballon de football et qui présente un aspect très différent des autres roches rencontrées jusqu'ici (Figure 22). C'est la deuxième fois que l'astromobile rencontre la roche « Bounce » durant sa mission sur Mars. La première fois avait eu lieu lors de la phase finale de l'atterrissage, quand les airbags ont percuté la roche quelques bonds avant que le module d'atterrissage d'Opportunity tombe et s'immobilise au fond du cratère « Eagle ». Sur la figure 22,

Figure 22 : Bounce (Crédit : NASA/JPL-Caltech/Cornell)

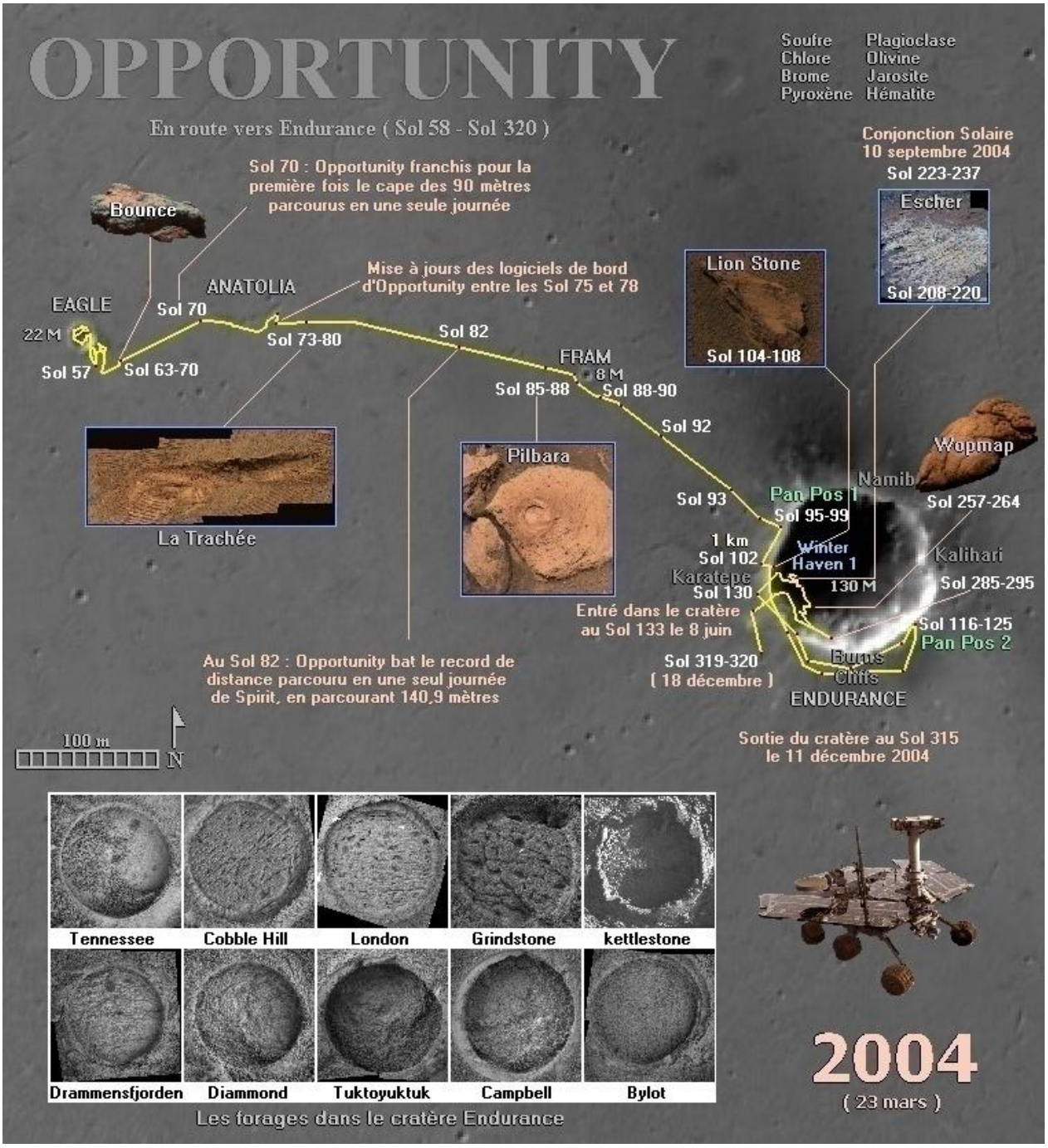


Planche 5 : Carte du trajet d'Opportunity entre les Sols 57 et 320. La photo d'arrière-plan a été obtenue grâce aux données fournies par la caméra Hirise de Mars Reconnaissance Orbiteur (MRO) le 8 juillet 2008. Position et trajet des rovers guidées par les cartes de la NASA et de Eduardo Tesheiner.

on peut voir l'emprunte laissé au sol par les airbags juste au dessus de « Bounce ». Le rover entame une série d'analyse sur la roche entre les Sols 63 et 70, et creuse avec son outil d'abrasion RAT un trou de 6,44 mm de profondeur sur la cible « Case » au Sol 66. Les analyses du spectromètre Mössbauer ont montré une forte concentration de pyroxène (69 %), de plagioclases (20 %) et d'olivine (11 %) dans la composition minéralogique de la roche, ce qui semble vouloir indiquer que la roche est de nature basaltique et qu'elle ne serait pas originaire de cet endroit.

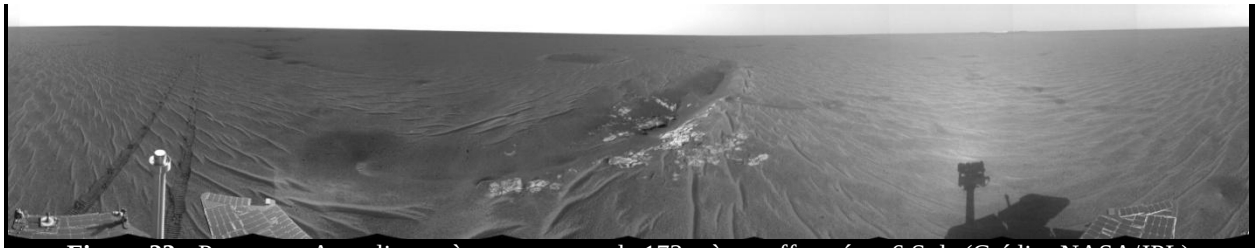


Figure 23 : Panorama Anatolia, après un parcours de 173 mètres effectué en 6 Sols (Crédit : NASA/JPL)

Elle aurait été éjectée des couches plus profondes de la planète lors d'un violent impact avec un gros météorite situé à plusieurs dizaines de kilomètres plus au sud. La composition chimique de la roche « Bounce » s'est révélée être semblable à celles de certaines météorites d'origines martiennes qui ont été retrouvées sur terre. Soit la météorite Shergotty tombée en Inde en 1865 et la météorite EETA79001-B qui a été retrouvée en Antarctique en 1979[15].

Opportunity reprend la route au Sol 70 (5 avril) à travers la vaste plaine sombre de « Meridiani Planum », sur un terrain plat dénudé de gros cailloux et parsemé de petites dunes de sable en forme de vaguelette de quelques centimètres de haut. L'astromobile franchit pour la première fois le cap des 90 mètres (98,9 m) parcourus en une seule journée à la surface de Mars, et arrive à la hauteur du sillon baptisé « Anatolia » de 50 mètres de long composé d'un alignement de plusieurs petites dépressions en forme de cuvette. Le rover longe par le sud la forme sinueuse du sillon jusqu'à son extrémité nord-est qu'il atteint au Sol 72, ou il en profite pour prendre avec ses caméras de navigations (NAVCAM) un cliché panoramique de 360° du paysage de la région composée de dix images (Figure 23 : la distance calculé est en fonction des séances de conduite effectuées depuis le dernier panorama « Lion King » pris au Sol 60). Le sillon « Anatolia » est situé à 150 mètres à l'est du cratère « Eagle » et à plus de 570 mètres à l'ouest du cratère « Endurance ». Différents affleurements rocheux de teinte claire sont visibles au fond et sur les bords des petites dépressions en forme de cuvette. Ce qui semble vouloir indiquer que les sillions se sont formées à partir de petite zone d'effondrement du sol ; causé soit par la fonte du pergélisol enfoui à faible profondeur, ou soit qu'il s'agisse tout simplement d'une autre forme d'érosion éolienne du sol à la surface de la planète Mars, ayant par exemple rempli de sable un alignement de petits cratères très anciens.

Figure 24 : La Tranchée creusée au Sol 73 (Crédit : NASA/JPL/Cornell)

L'astromobile s'arrête pour plusieurs jours au Sol 73, ou il en profite pour creuser une tranchée de 95 cm de long sur 16 cm de large par 11 cm de profondeur (Figure 24). Et que le rover analysera un peu plus tard, après avoir complété le téléchargement de la nouvelle mise à jour de ses fichiers informatiques. Pendant ce temps de l'autre côté de la planète, le rover Spirit qui est toujours en très bonne santé près de « Route 66 » dans le cratère « Gusev » dépasse l'objectif initial des 90 jours de sa mission. L'équipe des rovers demande alors une prolongation supplémentaire de six mois dans la durée de la mission des deux robots sur Mars, une prolongation qui sera reconduite à plusieurs autres reprises par la suite. Les mises à jour des logiciels de bord et de navigation du robot Opportunity,

[15] Principal component analysis of geochemical data at Gusev Crater : E. Tréguier, C. d'Uston and R. Gellert 2008.

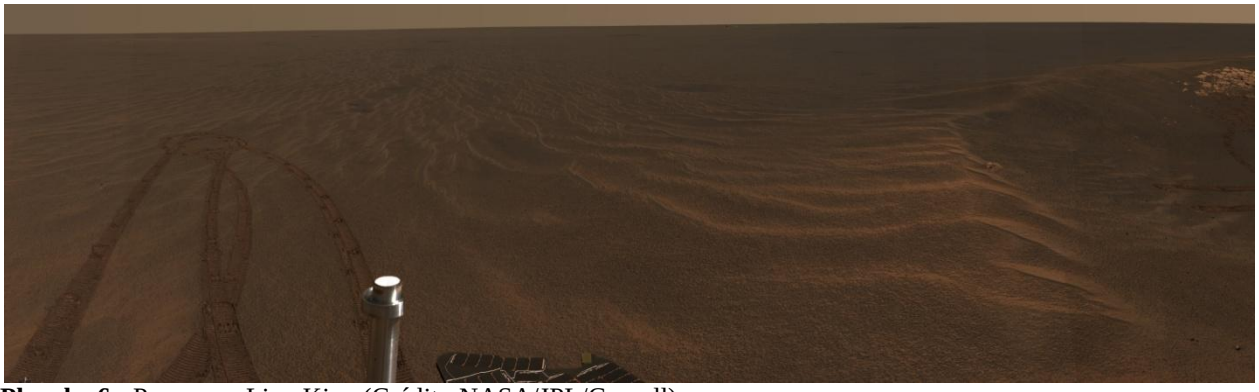


Planche 6 : Panorama Lion King (Crédit : NASA/JPL/Cornell)

qui ont pour objectif d'améliorer les performances de conduite et de navigation autonome sur le sol martien, commence au Sol 75 pour se terminer trois jours plus tard sur le Sol 78. Durant cette pose de quelques jours, l'astromobile en profite pour vider sa mémoire flash en transférant à la Terre une partie des données du panorama « Lion King » recueillie entre les Sols 58 et 60 (Planche 6), et les résultats des analyses de la roche « Bounce » réalisée entre les Sols 63 et 70. Le système informatique de bord du rover est réinitialisé et réamorcez comme prévu dès le lendemain sur le Sol 79 (13 avril), et l'astromobile entame aussitôt l'étude de la tranchée qu'il avait creusée six Sols plus tôt.

Figure 25 : Le cratère Fram pris au Sol 88 (Crédit : NASA/JPL/Cornell)

Figure 26 : Pilbara avant et après le brossage (Crédit : NASA/JPL/Cornell)

Le rover Opportunity accomplit une avancée fulgurante sur le Sol 82 le 17 avril 2004, en parcourant une distance record de 140,9 mètres en 3 heures, améliorant de plus de 42 mètres le record précédent réalisé au Sol 70. Un record qui ne sera pas battu par l'astromobile Spirit durant toute la durée de sa mission sur Mars dans le cratère « Gusev ». Le record de distance parcouru en une seule journée par le robot Spirit va donc rester de 123.7 mètres réalisés sur le Sol 125 de sa mission. Opportunity a parcouru une distance de 628 mètres depuis son atterrissage sur Mars jusqu'au Sol 82, dépassant du même coup les 600 mètres qui avait été fixés initialement comme l'un des deux critères de réussite pouvant garantir le succès de la mission. Le rover n'est plus qu'à 90 mètres du petit cratère d'impact « Fram » de huit mètres de diamètre (Figure 25), qu'il atteindra deux jours plus tard sur le Sol 84. L'astromobile parcours 25 mètres de plus au Sol 84, afin de longer la crête sud du petit cratère « Fram » pour se positionner près de la roche « Pilbara » (Figure 26). Le rover amorce alors une séquence d'étude détaillée de la roche entre les Sols 85 et 88, et creuse pendant près de deux heures et demie un trou d'une profondeur record de 7,2 mm au Sol 86, et découvre à l'intérieur une myrtille qui a été coupée en deux par les rotors de

Planche 6 : Suite du Panorama Lion King

la fraiseuse RAT. Des myrtilles composées d'hématite que l'on retrouve également éparpillée un peu partout sur le sol sombre de « Meridiani Planum », plus lourde que le sable et dégagés par l'érosion éolienne des roches sur une longue période de temps.

Opportunity termine l'analyse de « Pilbara » et repart vers le sud-est en direction du cratère « Endurance » au Sol 88. Le rover s'arrête de nouveau après avoir parcouru seulement 33 mètres, le temps de faire une série d'analyse sur des cibles sur le sol dénommé « Nougat » et « Fred Ripple » entre les Sols 89 et 91. L'astromobile franchit une nouvelle étape dans sa mission le 24 avril 2004, en dépassant le cap des 90 Sols passé à explorer la surface de la planète Mars. Le robot s'approprie ainsi le dernier critère de succès qui garantissait initialement la réussite officielle de la mission du rover sur Mars, avec une distance parcourue de près de 811 mètres. Opportunity reprend la route en direction du cratère « Endurance » sur le Sol 91, et franchit 196 mètres en quatre jours jusqu'au Sol 94. Les dix-sept derniers mètres sont franchis sur le Sol 95 (30 avril), et le rover s'arrête à 40 cm du rebord nord-ouest du cratère « Endurance » au site baptisé « Pan Pos 1 » (Planche 5). L'astromobile s'est immobilisé devant une pente de plus de 18 degrés d'inclinaison parsemée de magnifique affleurement rocheux qui tapisse les bords intérieurs du cratère. Le fond de la cuvette est garni de majestueuses dunes de sable de forme ondulante de plus d'un mètre de hauteur.

Figure 27 : Arrivé au cratère Endurance au site Pan Pos 1 (Crédit : NASA/JPL/Cornell)

Le rover profite de cette occasion très avantageuse pour étudier le cratère jusqu'au Sol 100, et entame entre les Sols 97 et 98 un cliché panoramique couleur des environs (Figure 27), composé d'une mosaïque de 258 images prises à l'aide de trois filtres de couleur différents. Le panorama de la figure 27 dévoile une vue spectaculaire qui donne accès à l'intérieur du cratère « Endurance » de 130 mètres de diamètre sur 20 mètres de profondeur, où l'on peut voir différentes strates rocheuses de type sédimentaire qui émerge et qui tapissent les parois internes du cratère, avec au fond un champ de petites dunes en forme de vaguelette. L'astromobile est plongé pour la première fois dans le mode de sommeil profond (Deep Sleep) au Sol 101. Il s'agit

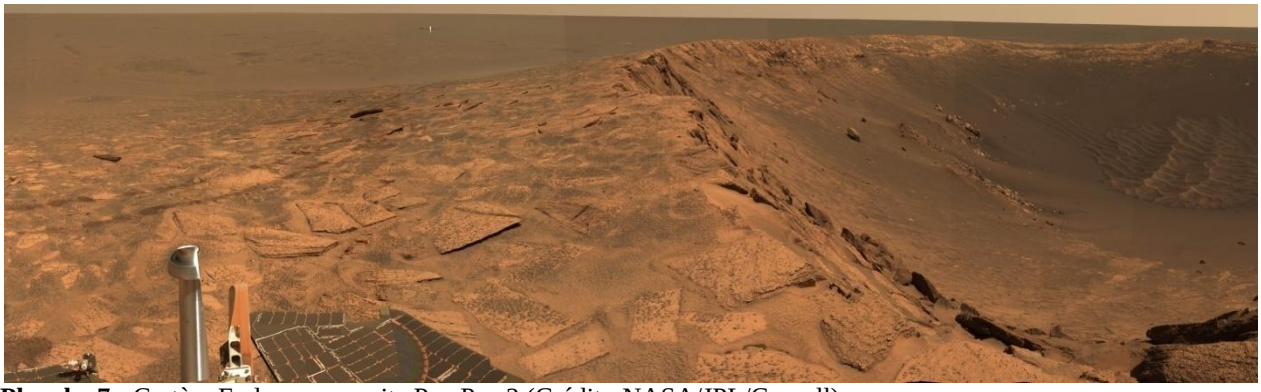


Planche 7 : Cratère Endurance au site Pan Pos 2 (Crédit : NASA/JPL/Cornell)

d'une procédure de sécurité qui interrompt durant la nuit l'alimentation électrique des résistances chauffantes du bras robotique, afin d'éviter que les batteries se vident trop vite de leur puissance. Le sommeil profond sera de plus en plus utilisé par la suite durant le reste de la mission du rover Opportunity sur Mars. Après avoir passé une nuit froide de –46 °C, l'astromobile reprend la route au Sol 102 et parcourt une distance de 45 mètres en contournant la crête sud-ouest du cratère dans le sens contraire des aiguilles d'une montre, et franchit le même jour le cap de son premier kilomètre parcouru à la surface de la planète Mars. Le rover tourne ensuite à l'Est au Sol suivant vers une région du cratère dénommée « Karatepe », et parcourt une courte distance de treize mètres vers le bord de la crête sud-ouest du cratère avant de s'arrêter de nouveau, le temps de faire un nouveau cliché panoramique des environs (Figure 28).

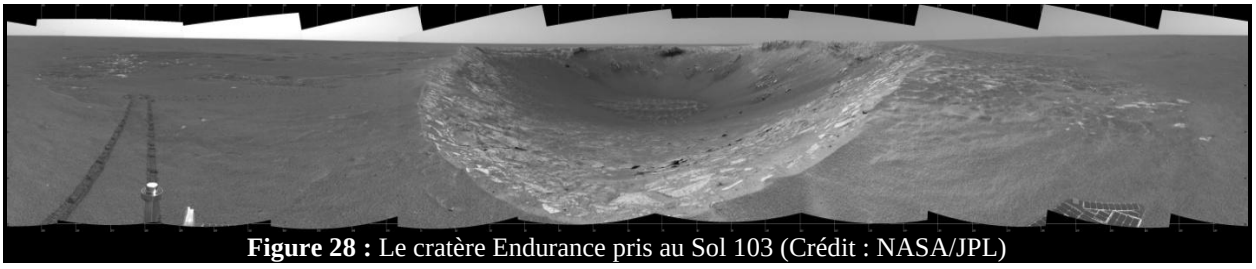


Figure 28 : Le cratère Endurance pris au Sol 103 (Crédit : NASA/JPL)

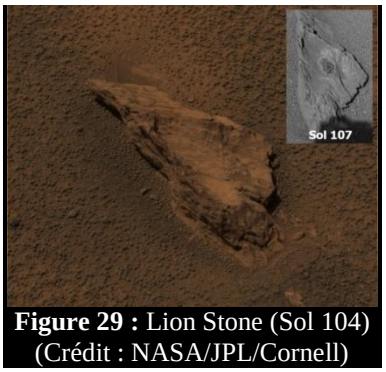


Figure 29 : Lion Stone (Sol 104) (Crédit : NASA/JPL/Cornell)

Opportunity rejoint la roche « Lion Stone » (Figure 29) de 30 cm de long sur 10 cm de large au Sol 104, et entame une nouvelle série d'analyse de plusieurs jours jusqu'au Sol 108, incluant une séance de brossage de la roche sur le Sol 107. Les analyses effectuées par les instruments du rover ont démontré que la roche était riche en sulfates, et qu'elle contenait des concrétions sphériques d'hématite semblables aux roches qui ont été analysées dans le cratère « Eagle ». L'astromobile jette également un petit coût d'œil à la zone d'impact de son bouclier thermique (Heat Shield), qui a protégé la capsule de descente contre la chaleur intense lors de la rentrée de la sonde dans l'atmosphère martienne, et qui s'est écrasée à 250 mètres au sud-ouest du cratère. Le bouclier thermique est visible vers le centre de l'image de gauche de la planche 7, sous la forme d'un petit reflet brillant situé à gauche du cratère « Endurance » tout juste en dessous de la ligne d'horizon, et on peut voir sur le sol une myriade de petites billes (myrtilles) de teinte bleue déposées en très grand nombre sur les pavées d'affleurements tout autour du cratère. Avec un plus fort grossissement, il est également possible

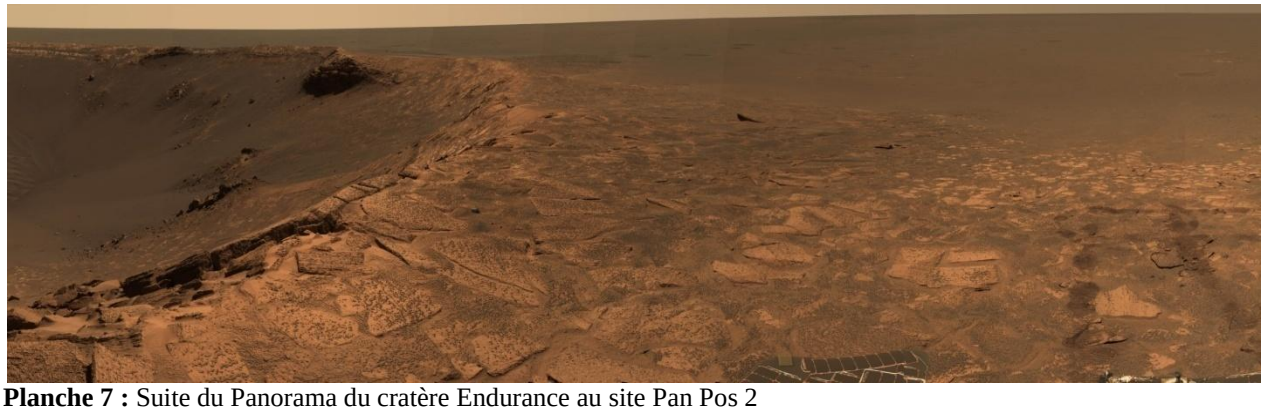


Planche 7 : Suite du Panorama du cratère Endurance au site Pan Pos 2

de voir le bouclier thermique dans la partie supérieure droite de la figure 28, qui correspond à la vue avant du rover. La télédétection infrarouge effectuée à distance par le spectromètre à émission thermique (Mini-TES) situé sur le mât du robot, a permis de cartographier la composition minéralogique des parois internes du cratère, et de faire ressortir la présence d'hématite, de sulfate et de basalte.

L'astromobile revient quelque peu sur ses pas au Sol 108 le 14 mai, et reprend sa route pour contourner la crête sud du cratère en parcourant une distance de plus de 165,7 mètres en une semaine jusqu'au Sol 115. Sur le Sol suivant le robot Opportunity se déplace vers la droite sur une courte distance de 1,5 mètre, afin de s'approcher à un mètre de distance d'une pente abrupte de 40 degrés. Le rover est maintenant perché au sommet de la crête sud-est du cratère « Endurance », ou il prend une pause bien méritée de dix jours entre les Sols 116 et 125 sur le site baptisé « Pan Pos 2 », qui se trouve à l'opposé du site « Pan Pos 1 » que l'astromobile a rencontré plus tôt au court de sa mission au Sol 95. Entre les Sols 117 et 123, le rover en profite pour prendre un nouveau panorama couleur du cratère « Endurance » (Planche 7), composé d'une mosaïque de 81 images prises à l'aide de six filtres de couleurs différentes. Durant son temps d'arrêt sur le site « Pan Pos 2 », le rebot en profite pour faire l'analyse de plusieurs cibles de terrain qui se trouvent sur le sol. Comme « Mc Donnell » au Sol 123, « Pyrrho » sur le Sol 124 et de « Diogenes » entre les Sols 124 et 126.

Opportunity teste l'adhérence et la dureté du sol martien en faisant marche arrière et en bloquant deux de ses roues motrices sur le Sol 126. N'ayant pas trouvé de meilleur point d'entrer dans le cratère, l'astromobile repart en direction inverse en parcourant 72 mètres vers le sud-ouest en direction de « Karatepe ». Le rover revient sur ses pas dans l'espoir de trouver un point d'accès vers l'intérieur du cratère. Le rebot parcourt 126 mètres entre les Sols 127 et 129, en contournant la crête sud du cratère dans le sens des aiguilles d'une montre, pour ensuite remonter vers le nord-ouest en direction de la roche « Lion Stone ». Opportunity parcourt encore 45 mètres au Sol 130 avant d'arriver vis-à-vis d'une pente inclinée de 20 degrés dans la région de « Karatepe » (voir la Figure 28). Une pente qui est suffisamment douce pour donner un accès sécuritaire vers les régions intérieures du cratère. L'astromobile amorce la descente de la pente du flanc intérieure ouest du cratère au Sol 133 (8 juin), en prenant bien soin de garder ses panneaux solaires orientés le plus possible vers le nord-est en direction du soleil pour optimiser la recharge de ses batteries. Le flanc intérieur du cratère renferme un empilement de plusieurs bandes horizontales de strates sédimentaires, qui présentent des couleurs et des textures très différentes (Figure 30). Ce qui semble vouloir indiquer une alternance de plusieurs chapitres différents dans

l'histoire géologique du cratère. Il pourrait s'agir par exemple de couche sédimentaire mince de brève durée composée de matériaux de type évaporite, qui aurait été mis en présence d'eau à plusieurs reprises dans le passé de la planète, espacé par des couches sédimentaires plus épaisses qui résulteraient uniquement de l'érosion éolienne sur des périodes de temps beaucoup plus longues. Les myrtilles que l'on retrouve en très grande quantité sur le sol et dans les roches auraient été dégagées par l'érosion éolienne, et les fines poussières poussées par les vents martiens auraient fini à la longue par éroder suffisamment les roches pour libérer les petites concrétions sphériques qu'elles contiennent en les faisant tomber et rouler sur le sol.

Figure 30 : Les sept forages exécutés à l'entrés du cratère (Karatepe) (Crédit : NASA/JPL/Cornell)

Opportunity part à la conquête des sept couches sédimentaires qu'il a identifié quelques mètres plus bas, et qui tapissent la surface de la partie supérieure des parois internes à l'entrée du cratère (« Karatepe »). Le rover parcourt avec prudence six mètres en 4 Sols lors de la descente de la pente intérieure du cratère, puis il s'arrête sur la première couche de roche sédimentaire au Sol 137 (couche A), qui se trouve à proximité du pavé d'affleurement « Tennessee » (Figure 30 et 31:b). L'astromobile utilise ensuite son outil d'abrasion RAT sur la roche, pour creuser un trou d'une profondeur record de 8,12 mm sur la cible « Volt » au Sol 138 (13 juin), et entame par la suite une série d'analyse jusqu'au Sol 141. Entre les Sols 143 et 145, c'est le tour du pavé d'affleurement « Kentucky » et de la cible « Cobble Hill » faisant partie de la couche B à subir le même sort avec un forage de 3,8 mm de profondeur. Puis, vient le tour de « Virginia » qui se trouve dans la couche C entre les Sols 145 et 147, avec un forage de 4,3 mm de profondeur. La quatrième séance de forage se termine avec « London » de la couche D entre les Sols 148 et 150, avec un forage de 4,5 mm de profondeur. Par la suite, le rover descend un mètre plus bas dans le cratère pour rejoindre l'affleurement « Manitoba » qui se trouve dans la couche E. La première cible à être creusée sur « Manitoba » est « Grindstone » entre les Sols 150 et 152 sur une profondeur de 2,7 mm, ou le robot a enregistré durant la nuit une température de –51 °C ; nous sommes au beau milieu de l'automne dans l'hémisphère sud de la planète. Le lendemain, Opportunity qui est sur une pente inclinée de 25,6 degrés étend son bras en contrebas, et creuse un deuxième trou sur l'affleurement « Manitoba » dénommé « Kettlestone » de 4,2 mm de profondeur entre les Sols 153 et 155. Le rover se déplace un mètre plus bas, afin de rejoindre la dernière cible qui se trouve sur le pavé d'affleurement « Millstone » entre les Sols 160 et 163 (du 5 au 8 juillet), ou Opportunity creuse un trou de 6,3 mm sur la cible « Drammensfjorden ». L'astromobile est maintenant descendu à plus de dix mètres à l'intérieur du cratère, et l'analyse des strates a dévoilé que la concentration de chlore et de pyroxène, un minéral de type basaltique, augmentait en fonction de la profondeur. L'analyse a également dévoilé la présence de sulfate de fer et de jarosite.

Opportunity poursuit son étude des strates sur les parois internes du cratère avec l'analyse de la cible « Dahlia » entre les Sols 166 et 167, puis il se déplace de trois mètres vers l'intérieur du cratère sur une pente de plus de 30 degrés d'inclinaison au Sol 169. Après avoir parcouru 3,7

Figure 31 : Vu de l'intérieur du cratère Endurance au Sol 171 (Crédit : NASA/JPL)

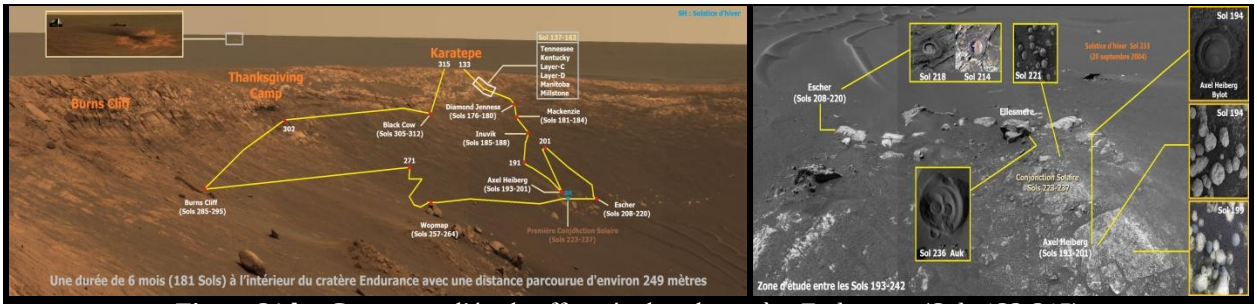


Figure 31 b : Campagne d'étude effectuée dans le cratère Endurance (Sols 133-315)
(image extrait de la Planche 7 et vers la partie du centre gauche de la figure 31)

mètres dans sa descente pour rejoindre une fracture sur le sol qui présente une série d'aspérité en forme de dent baptisée « Razorback ». L'astromobile nous offre une magnifique vue panoramique du paysage intérieure du cratère au Sol 171 le 18 juillet (Figure 31), qui montre en arrière-plan vers le haut du centre droit de l'image la zone de travail ou le robot a effectué les sept forages. Le rover entame une série d'analyse de « Razorback » aux Sols 171 et 172, et sur un morceau qui s'est détaché de la roche baptisée « Arnold Ziffel » entre les Sols 173 et 175. La pente du cratère devient plus sablonneuse et fait patiner de plus en plus les roues du rover à l'approche de l'affleurement rocheux baptisé « Diamond Jenness » entre les Sols 176 et 180, et qui est situé à une profondeur d'environ treize mètres dans le cratère. Opportunity creuse un trou d'environ 2 mm de profondeur sur la cible « Holman_3 situé sur l'affleurement au Sol 177, puis de nouveau le lendemain sur le Sol 178 pour atteindre une profondeur totale de 7 mm (Figure 32). L'astromobile se déplace ensuite sur une courte distance de 4,5 mètres vers une cible de surface dénommé « Campbell_2 » qui se trouve sur l'affleurement « Mackenzie » au Sol 181, ou il entame une nouvelle série d'analyse jusqu'au Sol 184. Le rover utilise son outil d'abrasion RAT pour creuser un petit trou dans le sable sur une profondeur de 8,4 mm au Sol 182, dans le but de polir les petites billes d'hématites qui si trouvent et de les analyser avec ses différents instruments scientifiques.

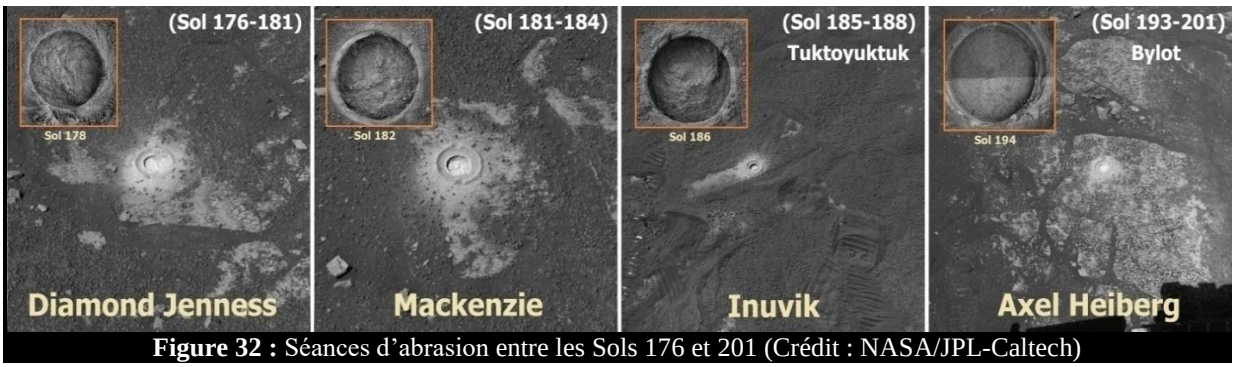


Figure 32 : Séances d'abrasion entre les Sols 176 et 201 (Crédit : NASA/JPL-Caltech)

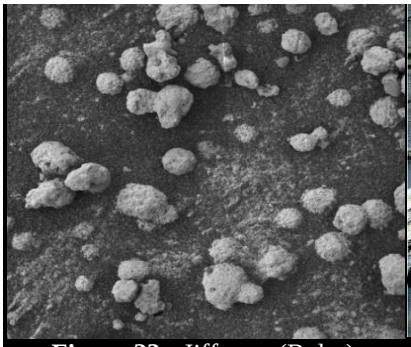


Figure 33 : Jiffypop (Bylot) (Crédit : NASA/JPL/Cornell/USGS)

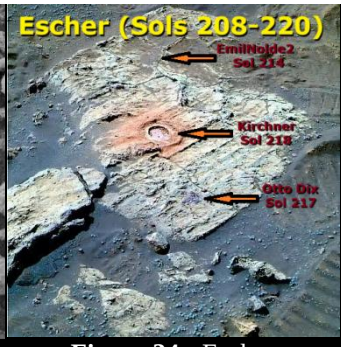


Figure 34 : Escher (Crédit : NASA/JPL/Cornell)

L'astromobile se déplace de 8,7 mètres vers le sud-est dans la direction de « Burns Cliff » sur le Sol 184 (Figure 37), afin de rejoindre et d'étudier entre les Sols 185 et 188, soit du 3 au 6 août, la cible « Tuktoyuktuk_2 » qui se trouve sur l'affleurement rocheux « Inuvik ». Opportunity entame un forage de 7,7 mm de profondeur sur l'affleurement au Sol 186. Ensuite, le rover parcourt une distance de 17 mètres vers le sud-est en direction de « Axel Heiberg » qu'il atteint au Sol 193, ou il entame une série d'analyse de l'affleurement jusqu'au Sol 199 le 17 août. Le forage d'une profondeur de 7,7 mm effectué sur la cible « Bylot » se trouvant sur l'affleurement « Axel Heiberg » au Sol 194, a dévoilé la présence de myrtille enrobée en forme de popcorn (Jiffypop) dans la roche (Figure 33). Sur le Sol 199, la puissance électrique du robot est montée à plus de 610 watts/heure pour la première fois depuis les cents derniers Sols. Le rover franchit ensuite 14 mètres vers l'ouest sur le Sol 201, pour se diriger vers l'extrémité d'une dune de sable qui s'élance dans sa direction depuis le fond du cratère. Après quelques tentatives, Opportunity doit abandonner son trajet par manque de traction de ses roues dans le sable fin et sablonneux qui remplit le fond de la cuvette du cratère, et qui devient de plus en plus épais rendue à cette profondeur. Le rover revient donc sur ses pas au Sol 203, et franchit 14,5 mètres avant de s'immobiliser aux deux tiers de la hauteur de la pente intérieure du cratère.

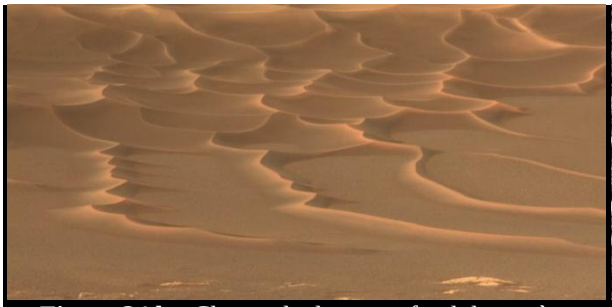


Figure 34 b : Champ de dunes au fond du cratère

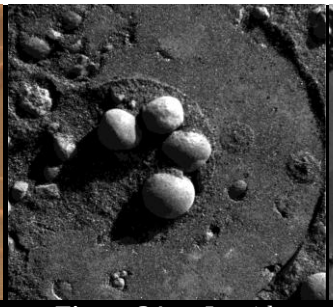


Figure 34 c : Le nid

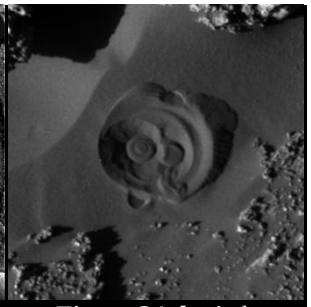


Figure 34 d : Auk

(Crédit : NASA/JPL/Cornell)

L'astromobile arrive près du pavé d'affleurement « Escher » au Sol 208 le 25 août (Figure 34), et il entame aussitôt une nouvelle série d'étude et d'analyse de plusieurs jours sur la roche. Le rover prend un cliché du champ de dune qui se trouve au fond du cratère au Sol 210 (Figure 34:b), et brosse deux cibles qui se trouvent sur le pavé d'affleurement « Escher ». Soit « EmilNolde2 » situé dans la partie supérieur de l'affleurement au Sol 214 et de la cible « Otto Dix » au Sol 217. Une séance d'abrasion est également exécutée au centre du pavé d'affleurement « Escher » sur la cible baptisée « Kirchner » avec une profondeur de 7,3 mm au Sol 218. Opportunity effectue un cours déplacement d'environ 4 mètres vers le sud-ouest et se prépare ensuite à survivre au silence radio d'une durée de deux semaines, qui aura lieu lors de la première conjonction solaire du 10 au 27 septembre 2004 entre les Sols 223 et 237, quand la planète Mars passera derrière le soleil par rapport à la terre. Le rover reçoit une programmation contenant une liste d'instruction pour le préparer à poursuivre des opérations en mode

automatique durant cette période, comme de prendre quotidiennement des mesures atmosphériques ou de faire des relevés avec le spectromètre Mössbauer. Aucun mouvement des roues ou du bras robotique n'est prévu pendant la période de conjonction, et le rover va communiquer quotidiennement avec l'orbiteur Mars Odyssey de la NASA. Pour l'occasion le robot Opportunity se positionne devant un petit champ de sphérules d'hématite étendu sur le sol martien situé près de la petite dune « Auk » (*Pingouin*), qui se trouve près de l'affleurement « Ellesmere », dans le but de faire des observations de cette zone de terrain durant cette pause de communication. L'astromobile assiste pour la première fois à l'arrivée du solstice d'hiver dans l'hémisphère sud de la planète, qui fait son entrée officielle le 20 septembre 2004 au Sol 233 (« Winter Heaven 1 »). Pour documenter le champ de myrtille situé près de « Auk », un petit regroupement ressemblant à des œufs dans un nid a été photographié au Sol 235 le 25 septembre (Figure 34:c). Et le lendemain au Sol 236 au milieu de l'après-midi vers 14 heures, la première séance d'abrasion effectué sur une cible de sol est exécuté sur la dune « Auk » (Figure 34:d). Après avoir survécu à la conjonction solaire, le rover reprend les communications radio avec la terre sur le Sol 238, et amorce l'analyse de la cible « Barbeau » qui se trouve sur la roche « Ellesmere » dès le lendemain entre les Sols 239 et 241.

Figure 35 : Wopmap

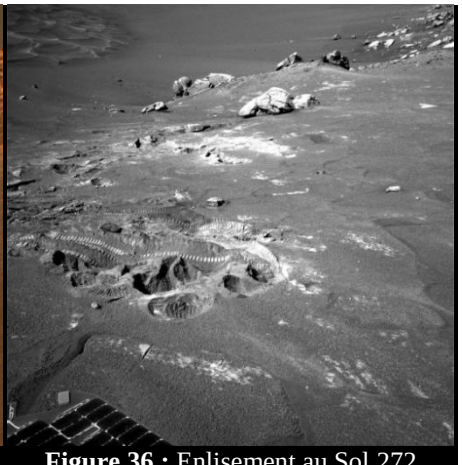


Figure 36 : Enlisement au Sol 272
(Crédit : NASA/JPL/Cornell)

Opportunity part en direction de la roche « Wopmap » au Sol 249 (Figure 35), qu'il atteindra deux jours plus tard sur le Sol 251 après avoir parcouru une distance de plus de 27 mètres. Cependant, l'accès à « Wopmap » n'est pas de tout repos, et le rover doit se reprendre à plusieurs reprises avant d'arriver à proximité de la roche d'un mètre de long. Opportunity atteint finalement son but au Sol 257 (14 octobre), et entame aussitôt une nouvelle série d'analyse de plusieurs jours sur les Sols suivants. La puissance électrique du rover est montée à plus de 700 watts/heure par jour, ce qui réduit la fréquence des sommeils profonds et qui donne plus de temps à l'astromobile pour effectuer ses activités quotidiennes et ses analyses d'échantillons sur le terrain. Le lendemain, Opportunity examine trois cibles sur « Wopmap », soit « la Loutre », « Jenny » et « Hiller » au Sol 258, et ensuite c'est le tour de la cible « Hercule » au Sol 262. Après être passé deux semaines à proximité de la roche « Wopmap », il est maintenant temps pour le robot au Sol 264 de partir vers l'est en direction de la falaise « Burns Cliff » (Figure 37), afin de trouver une route sécuritaire pour sortir du cratère. L'ascension de la pente vers la falaise « Burns Cliff » s'effectue avec beaucoup de difficulté, comme on peut le voir sur la figure 36. La pente du flanc intérieur du cratère située à cet endroit est inclinée de 30 degrés, et Opportunity ne

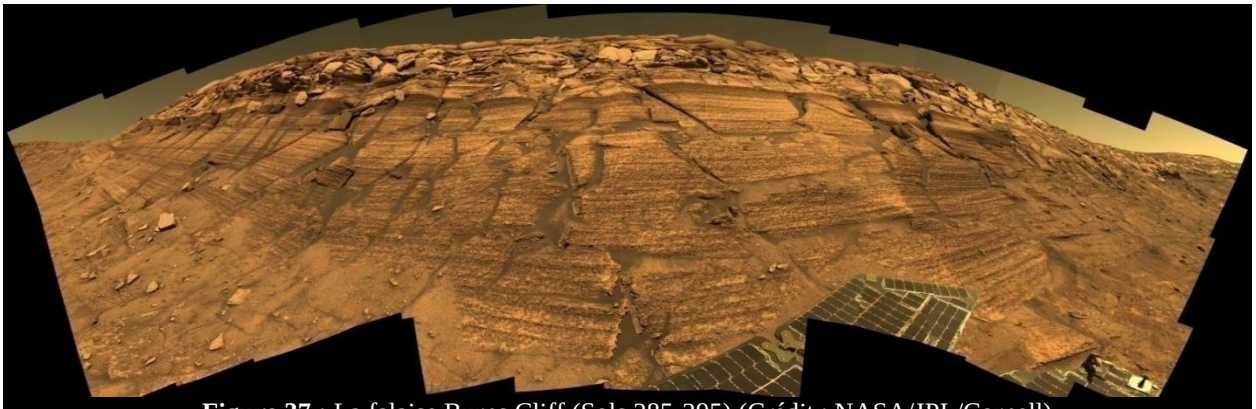


Figure 37 : La falaise Burns Cliff (Sols 285-295) (Crédit : NASA/JPL/Cornell)

trouve plus de route sécuritaire pour grimper plus haut. Le rover s'arrête pour plusieurs jours au Sol 285, le temps de trouver une nouvelle route pour sortir du cratère « Endurance ». L'astromobile restera stationné durant dix Sols au pied d'un empilement de roche stratifiée qui le surplombe sur plus de dix mètres de haut, et qui tapisse les parois internes de la falaise « Burns Cliff ». Opportunity prend un cliché de « Burns Cliff » entre les Sols 287 et 294 du 13 au 20 novembre (Figure 37), et profite de l'occasion pour faire toutes sortes d'analyses et de détections à distance, afin de déterminer si l'origine des strates observées est l'œuvre d'une sédimentation dans de l'eau ou de l'accumulation des poussières poussées par le vent martien. La décision fut prise au Sol 295 de rebrousser chemin vers l'ouest en direction de « Karatepe », afin d'aller rejoindre l'endroit par où le rover est entré dans le cratère « Endurance » en juin 2004 (Sol 133). Après avoir parcouru 12 mètres sur le Sol 296, le rover rencontre un terrain plat qui fournit désormais une meilleure adhérence pour ses roues.

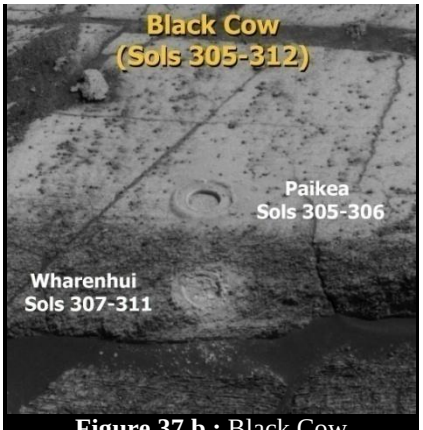


Figure 37 b : Black Cow
(Crédit : NASA/JPL-Caltech/Cornell)

Neuf jours plus tard, l'astromobile qui n'est plus qu'à 20 mètres du bord du cratère, entame une étude complète de la cible « Paikea » qui se trouve sur le pavé d'affleurement « Black Cow » avec une séance de brossage au Sol 305 et une séance d'abrasion le lendemain au Sol 306 (Figure 37:b) sur une profondeur de 6,3 mm. L'astromobile utilise à nouveau son outil d'abrasion RAT sur le Sol 307, afin de creuser un deuxième trou situé plus bas sur le même pavé d'affleurement sur la cible baptisée « Wharenhui », puis le rover creuse de nouveau plus profondément dans la même cible au Sol 311 pour une profondeur totale de 2,1 mm. Opportunity parcourt treize mètres à la fin du Sol 312 sur une pente de plus de 25 degrés, et s'arrête sur le bord du cratère à seulement cinq mètres de la sortie. L'astromobile sort finalement du cratère « Endurance » en franchissant les cinq derniers mètres au Sol 315 le 12 décembre 2004. Le travail d'Opportunity dans le cratère « Endurance » est maintenant terminé après être passé plus de 6 mois (181 Sols), et parcourut une distance d'environ 249 mètres à l'intérieur du cratère. A partir de l'étude et des observations des différentes couches sédimentaires qui composent les parois de la falaise « Burns Cliff », la formation Burns d'environ 7 mètres d'épaisseur a été divisée en trois sous unité (inférieure, moyenne et supérieure) (Figure 37:bb). L'unité inférieure (Lower) qui est la plus ancienne est formée de lits croisés à grande échelle, résultant de la sédimentasion de dépôt de grès éolien

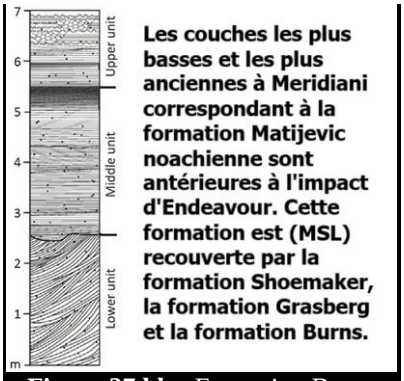


Figure 37 bb : Formation Burns

composée de dune de sable riches en sulfate de magnésium et de Fe (~20%). L'unité médiane (Middle) d'une épaisseur de 3 mètres plus riches en sulfate, résulte de la sédimentation sous forme de feuille de sable de dépôts éoliens mélangé à de l'eau souterraines acides (nappe phréatique) chargé en soufre provenant de l'altération de basalte et sayant remontée à la surface, prenant ensuite la forme de dépôts d'évaporite. L'unité supérieure (Upper) qui est la plus récente, est composée de la sédimentation de dépôt éolien sec résultant de la retombées aériennes de grains fins qui constituent les dunes de sable (Plage inter dunes)[16-17]. Ces trois unités sont considérées comme des grès formés de dépôts éoliens, composé essentiellement de grains de sable riches en divers sels de sulfate. Les matériaux initiaux se sont formés par l'altération chimique du basalte à olivine dans des solutions aqueuses d'acide sulfurique (avec nappe phréatique fluctuante), formant des sels de sulfate.

La puissance électrique du robot est passée de 840 watts/heure sur les pentes internes du cratère, quand le rover était plus incliné vers le soleil, à moins de 730 watts/heure à la sortie sur le terrain plus plat des plaines environnantes. Le premier objectif d'Opportunity à la sortie du cratère est de se diriger vers ses anciennes traces de roues laissées sur le sol six mois plus tôt, qui se trouvent à une quinzaine de mètres plus loin. Et d'amorcer une nouvelle campagne d'analyse entre les Sols 317 et 319, dans le but de comparer les effets de l'érosion avec des traces plus fraîches. Les observations effectuées sur l'empilement des strates sédimentaires de la falaise « Burns Cliff », ont démontré que les couches supérieures de la pile ont probablement été érodées par le vent, à la différence des couches inférieures qui montrent une plus forte concentration de chlore. Cet aspect des couches sédimentaires situées à la base de la falaise, semble vouloir indiquer que les dépôts ont été altérés à plusieurs reprises par la présence d'une fine couche d'eau liquide peu profonde. Il s'agit d'un phénomène qui est étroitement relié aux bassins d'évaporation et au matériau de type évaporite[18]. Au Sol 320 le 16 décembre 2004, le rover part en direction de son bouclier thermique (Heat Shield) qui a percuté le sol un peu plus loin à 200 mètres au sud du cratère.

[16] Provenance and diagenesis of the evaporite-bearing Burns formation, 22 September 2005
[17] Freeze-thaw cycles drove chemical weathering and enriched sulfates in the Burns formation at Meridiani, 2024 Jan 17
[18] Overview of the Opportunity Mars Exploration Rover Mission to Meridiani Planum: Eagle Crater to Purgatory Ripple, Squyres et al., 2004.

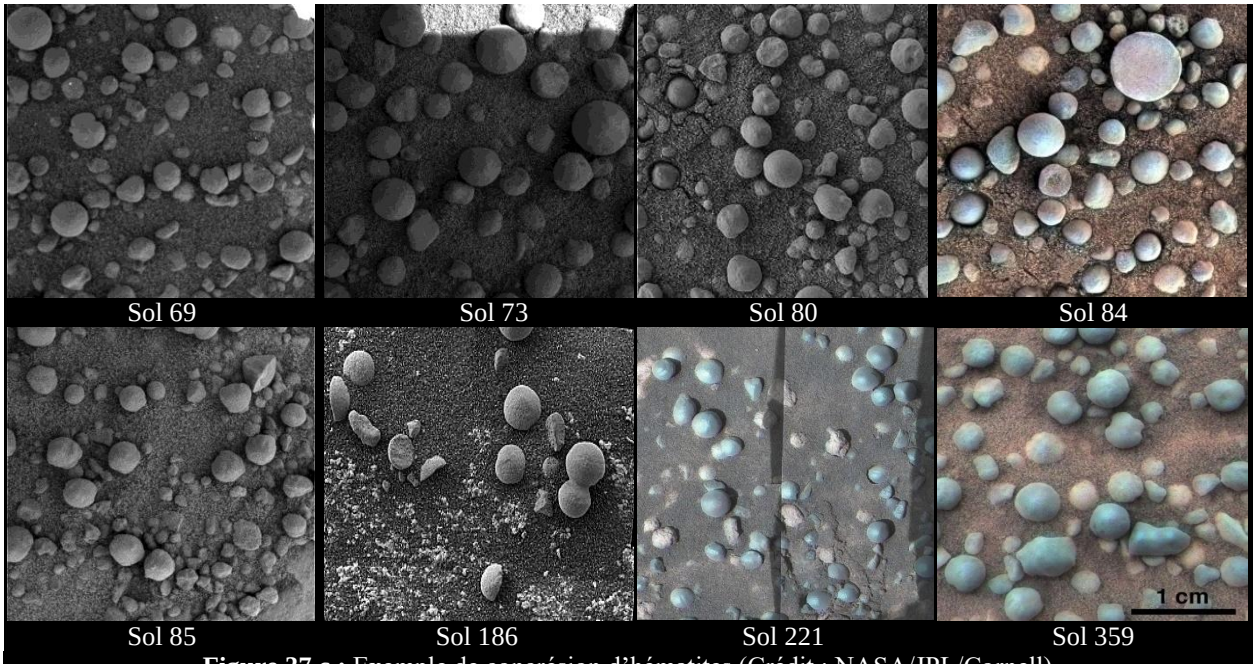


Figure 37 c : Exemple de concrésion d'hématites (Crédit : NASA/JPL/Cornell)

DE ENDURANCE À VICTORIA (Sol 321 à 952)

Le nouveau périple d'Opportunity dans les plaines volcaniques et désertiques de « Meridiani Planum » commence au Sol 321, avec une randonnée de 60 mètres sur un terrain sombre et plat parsemé de petites dunes ondulantes en forme de vaguelettes. Puis vers la fin de la journée, le rover prend avec ses caméras de navigations NAVCAM un cliché panoramique de 360° du paysage qui se trouve dans les environs sud-ouest du cratère « Endurance » (Figure 38). Le bouclier thermique est faiblement visible au centre du cliché, sous la forme d'un petit point brillant situé sous la ligne d'horizon à environ 120 mètres devant le robot, et on peut apercevoir les bords du cratère « Endurance » à chaque extrémité de la figure, qui correspond alors à la vue arrière du robot. L'astromobile reprend la route sur le Sol 324 et franchit 90 mètres en direction sud vers le bouclier thermique, puis il parcourt 27 mètres supplémentaires le lendemain au Sol 325 (23 décembre 2004), ou il franchit le cap de son deuxième kilomètre parcouru à la surface de Mars. Opportunity s'arrête pour prendre des photos du bouclier qui se trouve devant lui, et entame sur les Sols suivants l'analyse à distance du champ de débris qui entoure le bouclier thermique, qui s'est coupé en deux morceaux lors de l'impact avec le sol martien un an plus tôt.

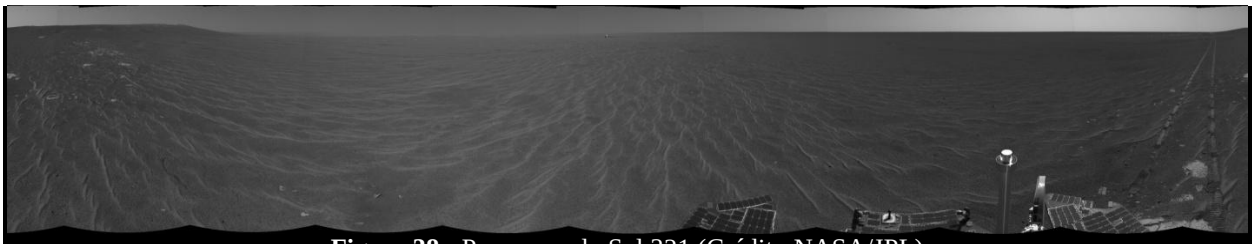


Figure 38 : Panorama du Sol 321 (Crédit : NASA/JPL)

Opportunity fait la rencontre de sa première tempête de poussière locale entre les Sols 329 et 331, avec un facteur Tau qui a monté jusqu'à des valeurs comprises entre 1,2 à 1,25. L'astromobile prend un magnifique cliché couleur du bouclier thermique sur le Sol 330 (Figure 39), puis il effectue un virage vers l'est au Sol suivant pour franchir une courte distance d'une dizaine de mètres vers le bouclier. L'approche finale s'effectue sur le Sol 332 (le 30 décembre 2004), ou le rover va s'arrêter quelques jours le temps de faire une analyse plus détaillée du bouclier et de ses environs.

Figure 39 : La région de l'impact du bouclier thermique

Figure 40 : Heat Shield Rock (Crédit : NASA/JPL-Caltech/Cornell)

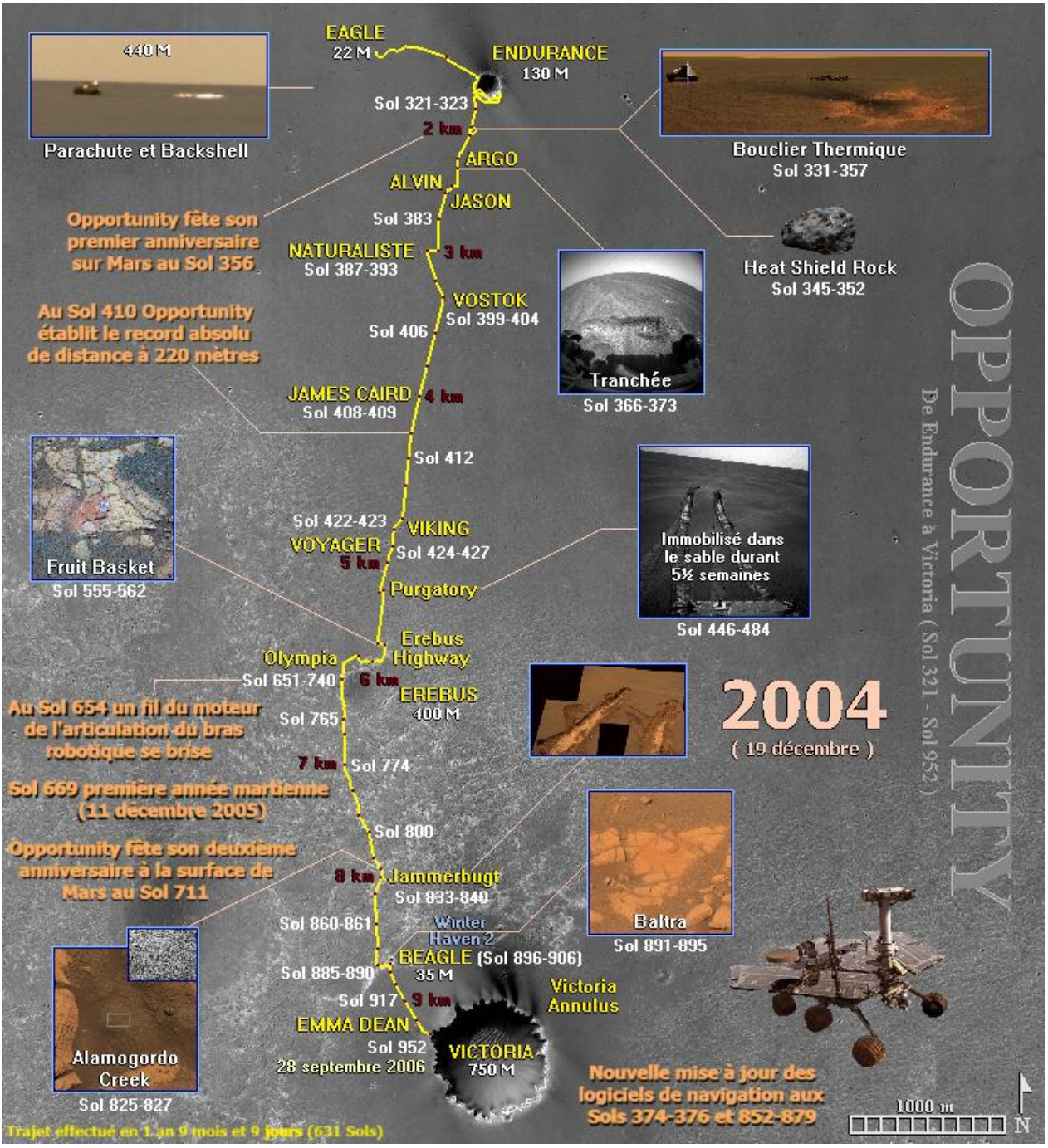


Planche 8 : Carte du trajet d'Opportunity entre les Sols 321 à 952 (631 Sols). La photo d'arrière-plan a été obtenue grâce aux données fournies par la caméra Hirise de la sonde Mars Reconnaissance Orbiteur (MRO) le 14 novembre 2006. Position et trajet des rovers guidées par les cartes de la NASA et de Eduardo Tesheiner.

Sur la figure 39, on peut voir des débris sur le sol autour du cratère d'impact du bouclier thermique, qui s'est retourné sur lui-même avec la force de la collision. Le bouclier thermique a résisté à des températures de plus de 2 000 °C lors de la rentrée dans l'atmosphère martienne en janvier 2004. Il a été éjecté 90 secondes avant l'atterrissage, et il a percuté le sol dans les plaines volcaniques de « Meridiani Planum » à environ 800 mètres au sud-est du cratère « Eagle ». Sur le Sol 339 le 6 janvier 2005, le rover photographie pour la première fois une météorite composée de

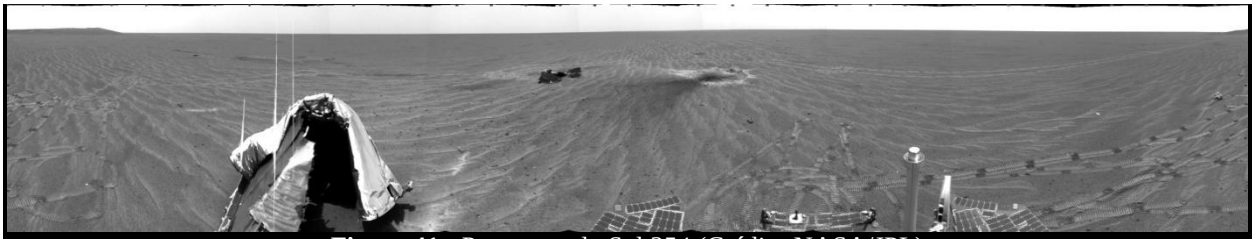


Figure 41 : Panorama du Sol 354 (Crédit : NASA/JPL)

Fer-Nikel à la surface de la planète Mars. La météorite de la taille d'un ballon de basket-ball a été baptisée pour l'occasion « Heat Shield Rock » (Figure 40), que le rover analysera plus en détail un peu plus tard au court de sa mission entre les Sols 345 et 352. En contournant le bouclier thermique par le sud-ouest (antihoraire), Opportunity fait plusieurs mesures et intégrations sur les débris qu'il rencontre sur le sol avec ses spectromètres Mössbauer, APXS et Mini-TES, en plus de prendre des images avec l'imageur microscopique miniature. Les temps d'intégration du spectromètre Mössbauer seront désormais de plus en plus longs, et ceci à cause de l'épuisement progressif de ses sources radioactives de cobalt 57 qui ont une durée de demi-vie de 271 jours.

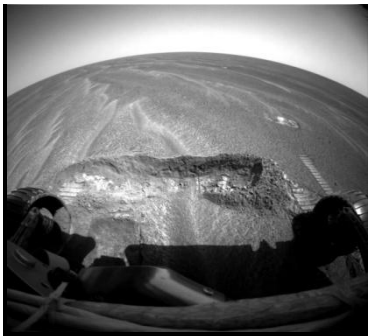


Figure 42 : Tranchée du Sol 366 (Crédit : NASA/JPL)

Le rover utilise son outil d'abrasion Rat sur le Sol 349, pour faire un brossage sur la météorite ferreuse qui se trouve à dix mètres au nord du bouclier, puis il effectue une nouvelle série d'analyse avec ses différents instruments scientifiques jusqu'au Sol 352. Les différentes mesures ont fait ressortir la nature ferreuse de la météorite. Opportunity prend un nouveau cliché panoramique de 360° avec ses caméras de navigation au Sol 354 (Figure 41), qui montre la région d'impact du bouclier thermique et la météorite « Heat Shield Rock », qui se trouve à l'extrême droite de l'image. L'astromobile fête son premier anniversaire à la surface de la planète Mars le 24 janvier 2005 sur le Sol 356, puis il quitte définitivement le bouclier thermique au Sol 359, pour reprendre sa route vers le sud en direction du petit cratère d'impact baptisé « Argo » qui se trouve 200 mètres plus loin. Opportunity arrive près du petit cratère « Argo » d'une dizaine de mètres de diamètre au Sol 360, et bas de nouveau des records de distance parcourus en une seule journée, en parcourant le même jour une distance de 153 mètres et de 156,4 mètres deux jours plus tard sur le Sol 362. Après avoir observé une petite roche sur le sol baptisée « Strange Rock » qui se trouvait sur sa route au Sol 365. Le rover creuse une tranchée sur la crête d'une petite dune le jour suivant (Figure 42), en faisant différentes manœuvres de roulement avec ses deux roues avant bloquées. L'astromobile entame par la suite l'analyse complète de la tranchée entre les Sols 367 et 373 (du 4 au 10 février 2005), avant de recevoir de nouvelle mise à jour de ses logiciels de navigations entre les Sols 374 et 376, qui ont pour objectif d'améliorer les capacités de navigations autonomes sur le terrain.

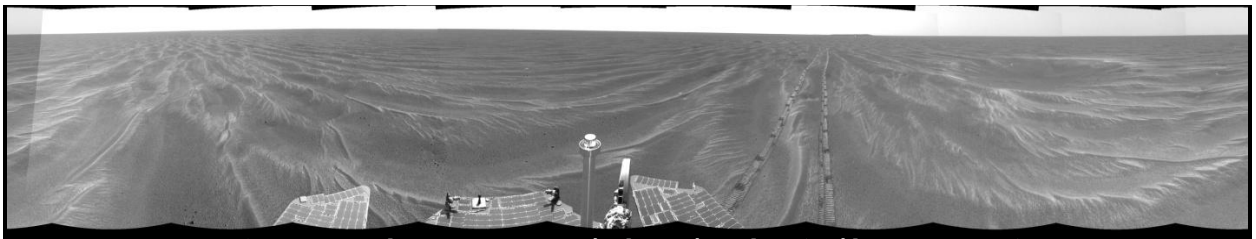


Figure 43 : Sol 381, Panorama près du cratère Alvin (Crédit : NASA/JPL)

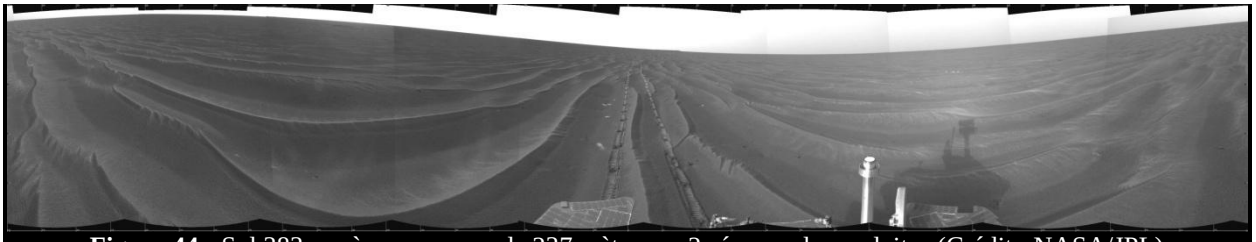


Figure 44 : Sol 383, après un parcour de 237 mètres en 2 séances de conduites (Crédit : NASA/JPL)

Opportunity reprend la route au Sol 378 en direction du sud à travers les plaines sombres et désertiques de « Meridiani Planum », et rencontre sur son chemin la roche baptisée « Russet » sur le Sol 379 à la hauteur du petit cratère « Alvin ». Le cratère « Alvin » d'une dizaine de mètres de diamètre est situé à environ 190 mètres au sud du cratère « Argo ». Le rover analyse « Russet » jusqu'au Sol 381 et prend un cliché panoramique de 360° de la région avec ses caméras de navigation (Figure 43), avant de poursuivre sa route vers un nouveau petit cratère baptisé « Jason » situé à 40 mètres plus au sud, et qu'il rejoindra dès le lendemain. On peut voir dans le haut vers le centre de la figure 43, juste à droite des traces de roue du rover, le cratère « Endurance » qui s'éloigne de plus en plus à l'horizon. Et avec un plus fort grossissement, on peut même voir le bouclier thermique qui est situé juste en dessous de la crête sud du cratère. En 5 Sols, soit entre les Sols 383 et 387, le rebot a parcourus une distance de 470 mètres en utilisant différents modes de navigation. Opportunity a utilisé le mode de conduite aveugle (blind drive), qui est programmé et planifié à l'avance sur Terre par les navigateurs de la NASA, et le mode de conduite autonome qui utilise uniquement les caméras de navigations assistées des logiciels de modélisation 3D du terrain (odométrie visuelle), pour aider le rover à planifier seuls des itinéraires avec des manœuvres d'évitements et de contournements d'obstacles. Durant ce long trajet, un nouveau record de distance parcourue en une seule journée a été établi sur le Sol 383 avec 177.51 mètres, et le rover a eu le temps de prendre un nouveau cliché panoramique de 360° (Figure 44) qui montre sa lente progression sur le terrain. Sur la figure 44, on peut voir un paysage sombre recouvert à perte de vue de petites dunes en forme de vaguelette d'une dizaine de centimètres de hauteur, composée essentiellement de sables aux grains très fins riches en sulfates de magnésium hydratés, comme la kiésérite ($MgSO_4$, H_2O).

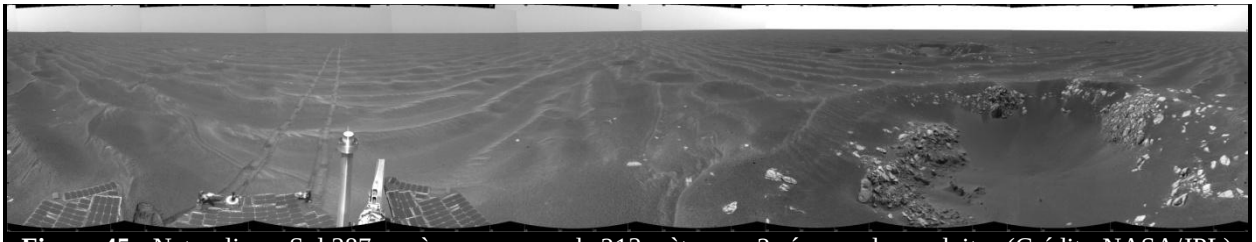


Figure 45 : Naturalisme Sol 387, après un parcour de 213 mètres en 2 séances de conduites (Crédit : NASA/JPL)

Opportunity rejoint un trio de petits cratères baptisés « Naturalisme », « Geographe » et « Investigator » au Sol 387 (24 février), qu'il prend en photo trois jours plus tard (Figure 45), et qu'il étudie par la suite durant une semaine entière jusqu'au Sol 393. Le rover franchit le même jour le cap de son troisième kilomètre parcouru à la surface de la planète depuis le début de sa mission sur Mars. Après avoir effectué l'analyse de la roche « Normandy » entre les Sols 392 et 393, l'astromobile qui est maintenant rendu à 1,2 km au sud du cratère « Endurance » se remet en route vers le cratère « Vostok », qui se trouve à plus de 320 mètres au sud de sa position actuelle. L'astromobile prend deux clichés panoramiques durant son trajet qui montre sa progression sur le

Figure 46 : Panorama du Sol 397 (Crédit : NASA/JPL)

Figure 47 : Sol 398, après un parcour de 95 mètres (Crédit : NASA/JPL)

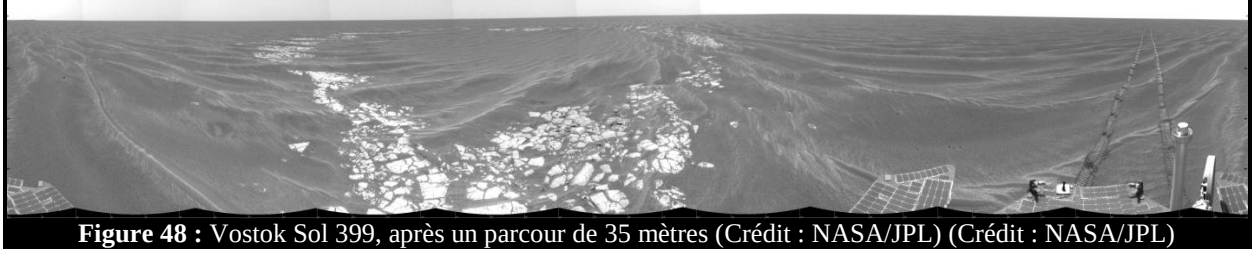


Figure 48 : Vostok Sol 399, après un parcour de 35 mètres (Crédit : NASA/JPL) (Crédit : NASA/JPL)

sol martien. Le premier cliché a été pris au Sol 397 après avoir parcourus 123,9 mètres au Sol précédent, et le second qui est espacé de 95 mètres de distance du premier a été pris sur le Sol 398 (Figure 46 et 47). On peut voir les contours du cratère « Vostok » émerger du sol sur la figure 48, délimités par des affleurements rocheux de couleur plus clair. Le rover rejoint le cratère « Vostok » de 45 mètres de diamètre dès le lendemain sur le Sol 399 (8 mars). Le cratère présente un relief très bas, et il est presque entièrement rempli de sable et de dépôts éoliens. L'astromobile étudie par la suite une cible sur le sol dénommé « Laïka », et une autre le jour suivant qui a été baptisé « Gagarin » qui est situé sur le paver d'affleurement « Yuri ». Les derniers échantillons ont été nommés en l'honneur de la chienne Laïka, le premier être vivant dans l'espace à bord du module Spoutnik 2 lancé le 3 novembre 1957, et du cosmonaute russe Youri Gagarine qui a été le premier homme dans l'espace à bord du module Vostok 1 lancé le 12 avril 1961. L'outil d'abrasion Rat du rover est utilisé sur le Sol 401-2 pour brosser et broyer la cible de roche « Gagarin », que l'astromobile étudiera par la suite jusqu'au Sol 405 (Figure 48:b).

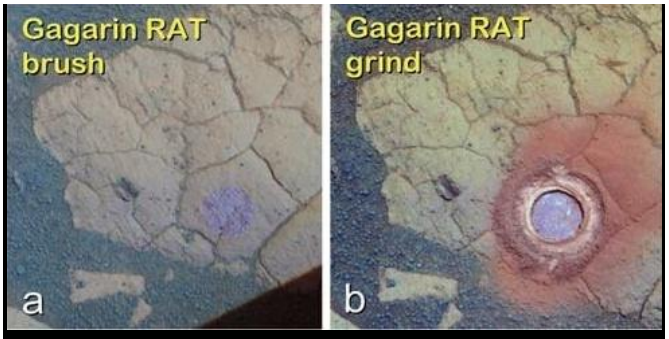


Figure 48 b : Gagarin Sol 401 (a) et 402 (b)
(NASA/JPL/Cornell/USGS/D. Savransky et Jim Bell)

Opportunity quitte le cratère « Vostok » au Sol 405 et poursuit sa longue randonnée vers le sud dans les plaines volcaniques de « Meridiani Planum » en direction des cratères « Viking » et « Voyager », d'une vingtaine de mètres de diamètre chacun et qui se trouvent à plus de 1,5 km de distance. Du Sol 405 au Sol 414, le rover établit de nouveaux records de conduite sur la distance parcourus en une seule journée. Il commence au Sol 406 avec un parcours de 183,04

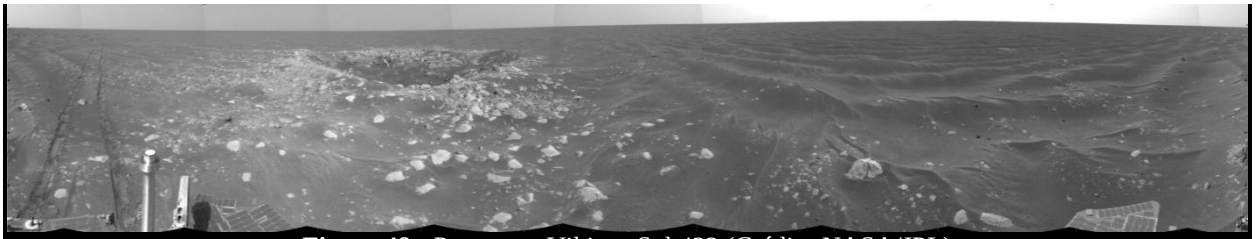


Figure 49 : Panorama Viking**:** Sol 422 (Crédit : NASA/JPL)

mètres en une heure, qu'il parcourt à une vitesse moyenne de 0,1 km/h avec les derniers 60 mètres en mode autonome. Opportunity parcourt 160,3 mètres au Sol 407 et un nouveau record est établi sur le Sol 408 avec une distance de 190,28 mètres, où l'astromobile franchit son quatrième kilomètre parcouru à la surface de la planète Mars en passant à la hauteur du petit cratère « James Caird » d'une quinzaine de mètres de diamètre. Sur le Sol 410 (le 20 mars), Opportunity a établi un nouveau record absolu qui ne sera plus battu par la suite au court de sa longue mission sur Mars, avec une distance parcourue en une seule journée de 219,89 mètres. Et le robot dépasse pour la première fois le kilométrage de son frère jumeau Spirit, qui est situé de l'autre côté de la planète dans le cratère « Gusev » occupé à faire l'ascension des pentes de « Husband Hill ». Viens ensuite un parcours de 180,5 mètres (Sol 412), puis de 174,7 mètres (Sol 413) et finalement de 183,2 mètres au Sol 414. En huit séances de roulements quotidiennes (au mois de mars 2005), le rover Opportunity a parcouru une distance mensuelle record de plus de 1 415,81 mètres dans la plaine sombre et désertique de « Meridiani Planum », soit plus de 29,5 % de la distance totale depuis le début de la mission, qui était alors de 4 806 mètres.

Figure 50 : Enlisement des roues avant et arrière au Sol 446 (Crédit : NASA/JPL)

L'astromobile entame l'analyse du contenu minéral d'une cible de sol qui se trouve au creux de l'une des petites ondulations entre les Sols 415 et 417, qui a été baptisée pour l'occasion « Mobarak », puis sur la crête d'une autre ondulation entre les Sols 418 et 420. Le rover se remet en route sur le Sol 421 (le 31 mars) en direction du cratère « Viking », qu'il atteindra dès le lendemain après avoir parcouru 71 mètres, et il entame par la suite le magnifique panorama de 360° des environs du cratère avec ses caméras de navigation (Figure 49). Le 1er avril 2005, la mission d'exploration des rovers à la surface de la planète Mars, qui a été prolongée de six mois à deux autres reprises, est maintenant prolongée de 18 mois jusqu'en septembre 2006. Opportunity parcourt 109 mètres supplémentaires au Sol 423 et arrive à la hauteur du versant ouest du cratère « Voyager », ou il s'arrête un peu le temps d'étudier les environs jusqu'au Sol 427 (6 avril). L'astromobile reprend la route sur le Sol 428 en direction du cratère « Erebus » de 400 mètres de diamètre, et franchit le même jour le cap de son cinquième kilomètre parcouru à la surface de la planète Mars.

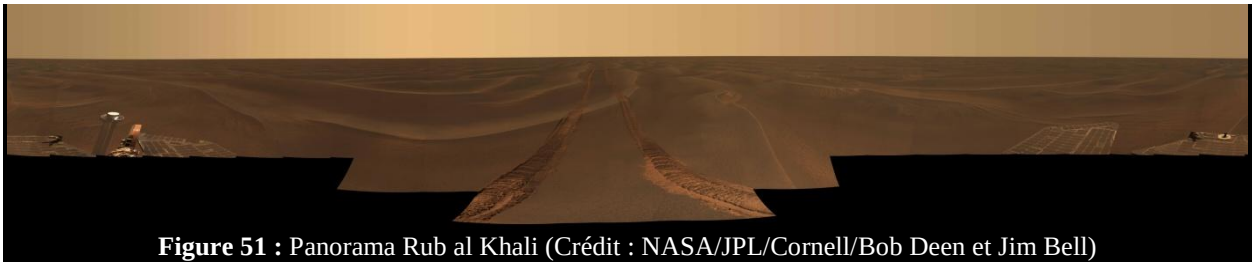


Figure 51 : Panorama Rub al Khali (Crédit : NASA/JPL/Cornell/Bob Deen et Jim Bell)

Figure 52 : Purgatory au Sol 491 (Crédit : NASA/JPL)

Opportunity éprouve de plus en plus de difficulté à progresser sur le terrain qui est de plus en plus ondulé et sablonneux, composé d'une poussière très fine qui fait caler à l'occasion les moteurs des roues avant du rover. À partir du Sol 433 (12 avril), et après avoir franchis une distance de 151 mètres dans sa redonnée quotidienne sur Mars, l'astromobile éprouve des problèmes avec le moteur de direction de sa roue avant droite, et doit marquer une pause de quelques jours pour trouver ce qui ne va pas. Le lendemain, le rebot recule d'un mètre pour vérifier si un obstacle avait gêné sa progression sur le terrain, mais rien ne fut trouvé. Un actuateur défectueux coince l'alignement de la roue avant droite de 7 degrés vers l'intérieur, et la décision fut prise de faire progresser le robot en marche arrière sur le Sol 437 et les Sols suivants, afin de voir si une meilleure distribution du lubrifiant dans les roues pouvait soulager le problème. Après avoir parcouru 40 mètres sur le Sol 446 le 26 avril, le rover s'enlise à une distance de 400 mètres du cratère « Erebus » en essayant de gravir la pente d'une petite dune de 35 centimètres de haut. Les quatre roues avant du rover perdent de leurs adhérences sur le sol et tournent sur elles-mêmes en s'enfonçant de plus en plus dans la fine poussière de la dune. Opportunity n'arrive plus à se dégager de ce bourbier qui a été baptisé pour l'occasion « Purgatory ». Le rover qui a repris la conduite en marche avant est resté ensablé durant presque 5 semaines dans la dune, avant de pouvoir sortir définitivement de son emprise le 3 juin au Sol 484. Durant cette longue période d'ensablement, l'astromobile a photographié la terre dans le ciel martien au Sol 449, et a fait le panorama couleur de 360° « Rub al Khali » entre les Sols 456 et 464 (Figure 51) composés d'une mosaïque de 97 images prises à l'aide de cinq filtres de couleurs différents, en plus de faire des observations atmosphériques quotidiennes et de recharger ses deux batteries au lithium. Un test de la caméra infrarouge du Mini-TES effectué sur le Sol 487, redonne même des signes de vie depuis la défaillance rencontrée sur le Sol 440. Le spectromètre infrarouge Min-TES est ensuite utilisé pour étudier les tranchées de dix centimètres de profondeur creusées dans la dune, et le rover reprend une série de photo de la région au Sol 491 (Figure 52).

Le rover reste à proximité de la dune « Purgatory » jusqu'au Sol 517, afin de l'étudier plus en détail. Par la suite, Opportunity contourne la dune par l'Est pour rejoindre le creux d'un large sillon qui pointe vers le sud, et reprend sa route vers le cratère « Erebus » en évitant le plus possible de gravir la crête des dunes qu'il rencontre sur sa route. L'astromobile n'a parcouru que 61 mètres en 71 Sols, soit depuis son enlisement au Sol 446 (26 avril) jusqu'à son départ de la dune « Purgatory » sur le Sol 517 (8 juillet). Opportunity parcourt 141 mètres supplémentaires en 13 Sols en passant dans le creux des sillons des dunes, et se dirige vers une autoroute qui est moins sablonneuse baptiser « Erebus Highway » qui se trouve à 50 mètres plus au sud. Le rover arrive à la hauteur de l'autoroute « Erebus Highway » au Sol 543, qui se trouve à environ 200

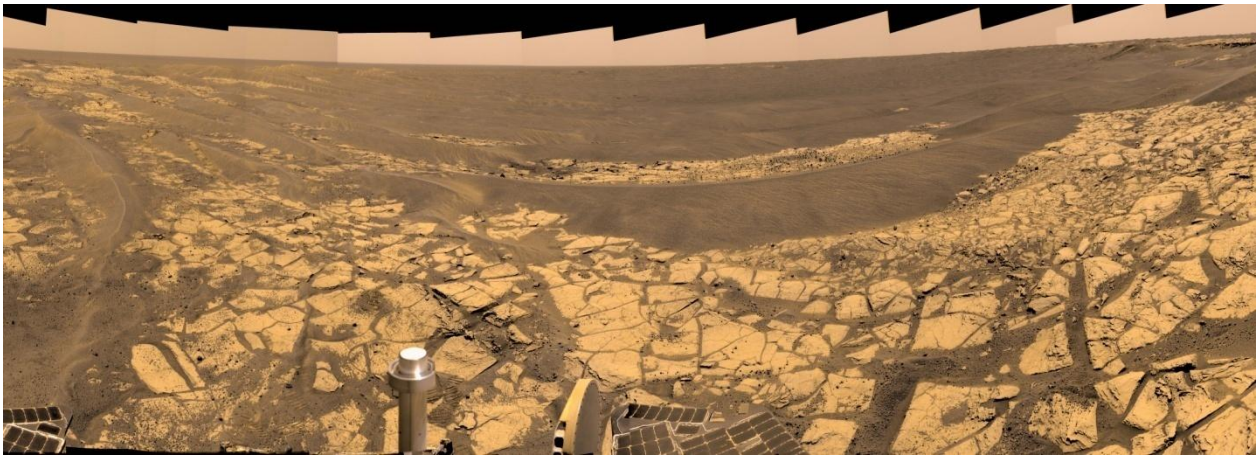


Planche 9 : Panorama du cratère Erebus (Crédit : NASA/JPL-Caltech/Cornell)

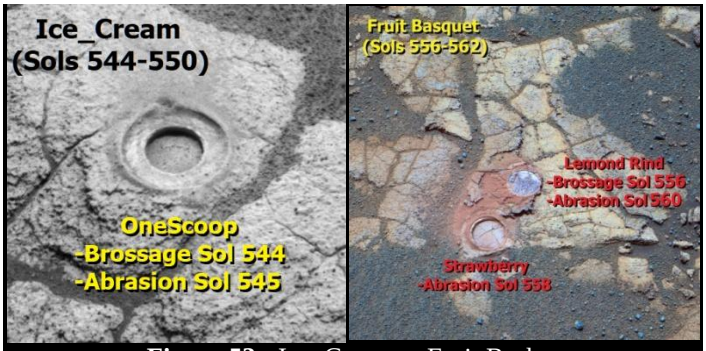


Figure 53 : Ice_Cream et Fruit Basket (Crédit : NASA/JPL/Cornell)

mètres au nord du cratère « Erebus », et qui présente un mince tapie des pavés d'affleurement rocheux aux teintes claires recouvertes de fentes de dessiccations. Le rebot s'arrête sur le Sol 545 près de l'affleurement rocheux « Ice_Cream » pour creuser un trou de 6 mm de profondeur avec son outil d'abrasion RAT sur une cible baptisé « OneScoop », qu'il analysera par la suite durant quatre jours jusqu'au Sol 550 (Figure 53). L'astromobile parcourt ensuite 26 mètres vers un autre pavé d'affleurement rocheux qui contient un champ de petits cailloux étendus sur le sol, et entame l'analyse de la roche « Arkensas » sur le Sol 551 (11 août), puis le lendemain c'est le tour de la cible sur le sol baptisé « Reiner Gamma » jusqu'au Sol 555. Opportunity se déplace ensuite de trois mètres pour amorcer une nouvelle campagne d'analyse sur une cible de sol baptisée « Lemond Rind » (*Zeste de citron*), qui se trouve sur l'affleurement « Fruit Basket » (*Corbeille de fruits*) entre les Sols 556 et 562 (Figure 53). L'affleurement rocheux « Fruit Basket » est une roche sédimentaire qui est recouverte de petites fissures qui ressemblent beaucoup à des fentes de dessiccations (zone d'assèchement), ou à des zones de fracture causée par la propagation d'onde de choc dans le sous-sol libéré par l'impact de gros météorites à proximité.

Après avoir effectué une courte randonnée de 50 mètres vers l'est, le rover a repris sa route vers le sud au Sol 582 (12 septembre) en roulant sur les pavés d'affleurement rocheux de l'autoroute « Erebus Highway ». Opportunity arrive finalement à la hauteur du cratère « Erebus » au Sol 590, qui se trouve à plus de 3,7 kilomètres au sud du cratère « Endurance ». L'astromobile rencontre l'affleurement « South Shetland » sur son chemin au Sol 592, et amorce une séance de brossage dès le lendemain sur la cible « Penguin » qui se trouve sur « Elephant » que le robot analysera par la suite durant une semaine jusqu'au Sol 600 le 1er octobre. Le rover reprend la route dès le jour suivant, en amorçant le contournement du cratère « Erebus » par le nord-ouest dans le sens inverse des aiguilles d'une montre. Pendant ce temps de l'autre côté de la planète dans le cratère « Gusev », le rover Spirit atteint le sommet de « Husband Hill ». Opportunity franchit la barre des 6 000 mètres parcourus à la surface de la planète Mars sur le Sol 605 (5

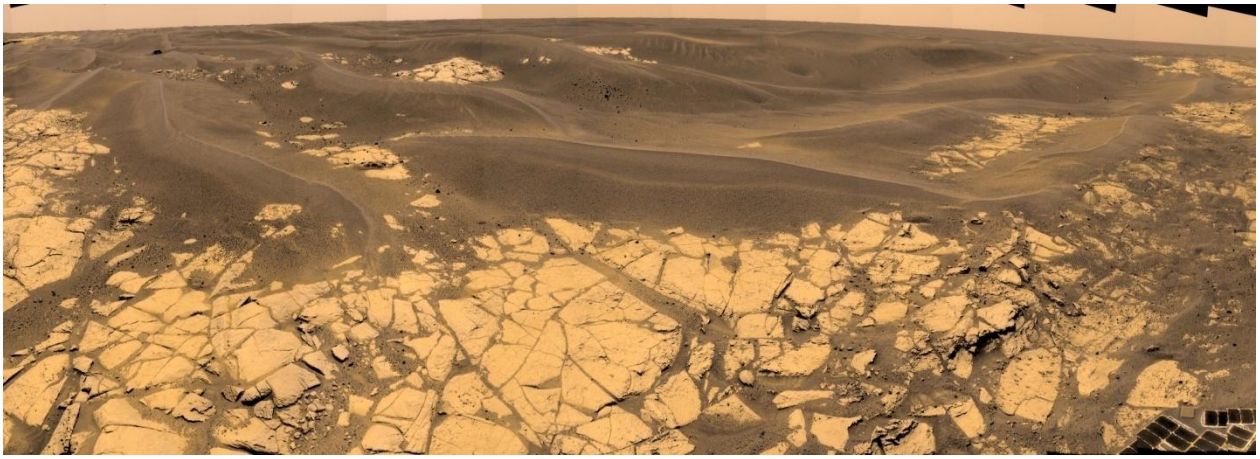


Planche 9 : Suite du Panorama de 360° du cratère Erebus.

octobre), puis le robot tourne vers le nord au Sol 618 pour éviter des dunes trop hautes en se faufilant dans le creux des sillons des dunes les moins élevés. Sur le Sol 622 (23 octobre), le robot subit un réamorçage intempestif de son système informatique de bord, similaire à celui qu'il a déjà rencontré sur le Sol 596 près de la roche « South Shetland ». Il s'agit d'une situation bien connue par le rover Spirit dans le cratère « Gusev », qui a rencontré ce genre de problème au Sol 18, 131 et 209 de sa mission. Il s'agit d'un mauvais fonctionnement du logiciel de bord sur le traitement des priorités d'accès en zone-mémoire, contrôlée par un mutex pendant une courte période de vulnérabilité de quelques microsecondes. Il en résulte alors un télescopage de deux commandes d'écritures en zone-mémoire qui provoque le réamorçage de l'ordinateur de bord du robot. Pendant que l'astromobile redescend vers le sud-ouest au Sol 624 pour longer la crête ouest du cratère « Erebus » baptisé « Mogollon Rim », une deuxième tempête de poussière régionale se lève dans la région de« Margaritifier », qui se trouve à l'ouest de « Meridiani Planum ». Les poussières en suspension obscurcissent le ciel martien en faisant grimper le facteur Tau à 1,6 sur le Sol 627, et la production d'énergie descend jusqu'à 479 watts/heure deux jours plus tard au Sol 629.

Figure 53 b : Kalavrita et Ziakas (Crédit : NASA/JPL/Cornell)

Opportunity arrive sur le site « Olympia » situé sur le flanc nord-ouest du cratère « Erebus » au Sol 632, et entame une nouvelle campagne de forage sur une cible de roche baptisée « Kalavrita » au Sol 633, incluant le brossage de la cible « Ziakas » au Sol 638 qui se trouve un peu plus bas sur l'affleurement (Figure 53:b). L'énergie fournie par les panneaux solaires remonte à plus de 720 watts/heure à partir du Sol 638 (9 novembre), soit juste après le passage de la tempête de poussière. Le rover se déplace de six mètres en direction d'une cible de roche baptisée « Antistasi », qui se trouve sur le pavé d'affleurement « Agrafa », et entame aussitôt une nouvelle série d'analyse entre les Sols 641 et 644. Les roches analysées jusqu'ici sur les différents pavés d'affleurement stratifiés autour du cratère « Erebus » sont composées essentiellement de minerais de type basaltiques. Opportunity reprend la route sur le Sol 645, tout en effectuant plusieurs analyses de cible qui se trouvent sur les pavés d'affleurements rocheux qu'il rencontre sur sa route (Show Low, Sedona, Winslow et Snowflak), puis le rover tourne vers le sud au Sol 649 pour longer la crête ouest du cratère « Erebus ». Un fil dans le moteur de l'articulation de l'épaul

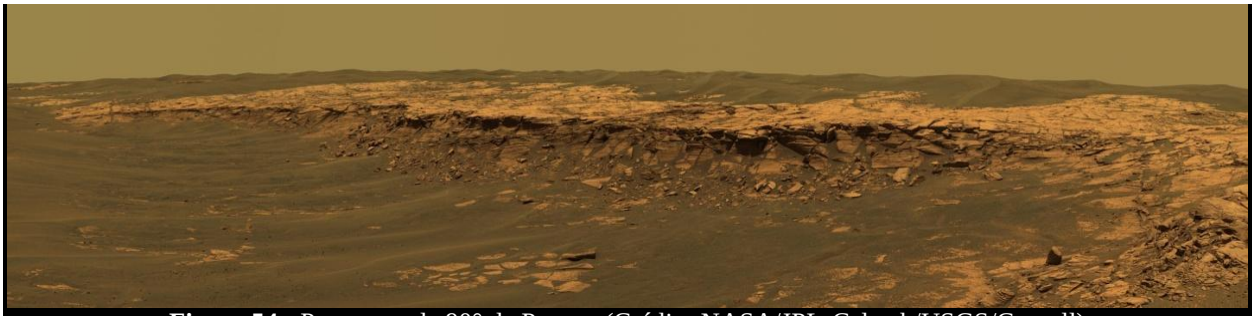


Figure 54 : Panorama de 90° de Payson (Crédit : NASA/JPL-Caltech/USGS/Cornell)

du bras robotisé (IDD, Instrument Deployment Device) se brise au Sol 654 (26 novembre 2005), et la commande de déploiement du bras vers un affleurement rocheux stratifié ne répond plus. Le bras finit par se déployer correctement sur le Sol 671 (13 décembre) près d'une cible appelée « Williams », ou le rover restera immobile durant presque un mois jusqu'au Sol 707 le 19 janvier 2006. Le temps de trouver une nouvelle position de stockage du bras lors des déplacements du robot sur le sol martien, et ceci afin de sécuriser les instruments scientifiques qui se trouvent à son extrémité.

Figure 55 : Ted Sol 692 (Crédit : NASA/JPL/Cornell/USGS D. Savransky et Jim Bell)

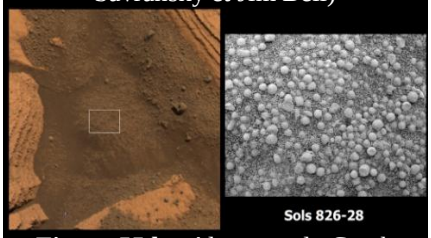


Figure 55 b : Alamogordo Creek (Crédit : NASA/JPL/Cornell/USGS)

L'astromobile profite de ce long temps d'arrêt de plus de deux mois, pour effectuer plusieurs analyses de roche (Williams et Ted) qui se trouvent sur le pavé « Rimrock » de l'affleurement rocheux « Olympia » entre les Sols 651 et 706 (Figure 55). « Ted » sera brossé au Sol 680 puis abrasé au Sol 691. Opportunity effectue également des observations atmosphériques conjointes avec la sonde spatiale européenne Mars Express, et entame un cliché panoramique couleur de 360° du cratère « Erebus » (Planche 9) entre les Sols 652 et 663 (du 23 novembre au 5 décembre). L'astromobile fête son premier anniversaire martien au Sol 669 le 11 décembre 2005, et observe le transit de « Deimos » dans le ciel martien la veille de son départ sur le Sol 706. Après avoir passé 56 Sols d'immobilité sur le flanc nord-ouest du cratère « Erebus », le rover reprend la route vers le sud en longeant la crête « Mogollon Rim » au Sol 707 le 19 janvier 2006, avec le bras qui est désormais placé en position horizontale, puis il observe le transit de Phobos dans le ciel martien au Sol 709. Quatre jours plus tard le 24 janvier 2006, le robot Opportunity fête son deuxième anniversaire à la surface de la planète Mars sur le Sol 711, et l'astromobile est toujours en état de rouler et en très bonne santé pour poursuivre sa mission d'exploration de la surface martienne. Après avoir effectués l'analyse des cibles « Overgaard » entre les Sols 707 et 723, de « Roosewelt » entre les Sols 724 et 730 (Figure 59:c), et de « Bellemont » entre les Sols 731 et 740 sur le site de l'affleurement rocheux « Olympia ». L'astromobile reprend la route au Sol 741 le 23 février en direction d'un nouvel affleurement rocheux baptisé « Payson », qui se trouve 70 mètres plus au sud. Durant ce temps de l'autre côté de la planète dans le cratère « Gusev », le rover Spirit fait son arrivée au pied du plateau circulaire « Home Plate ». Entre les Sols 742 et 757, le rover Opportunity longe l'affleurement « Payson » qui borde une petite partie du flanc intérieur sud-ouest de la crête « Mogollon Rim » du cratère « Erebus ». L'affleurement « Payson » est

composé d'un empilement de strates rocheuses sédimentaires d'un mètre de haut sur environ 125 mètres de long, et le rover en profite durant le trajet pour faire un cliché panoramique des lieux sur le Sol 744 (Figure 54).

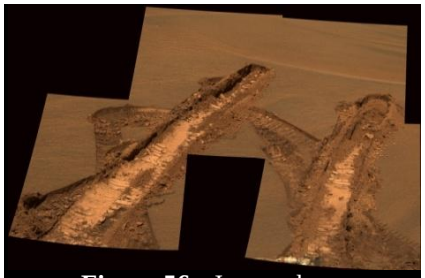


Figure 56 : Jammerbugt (Crédit : NASA/JPL-Caltech/Cornell)

Opportunity quitte le cratère « Erebus » au Sol 760 (14 mars), et se remet en route à travers les plaines volcaniques et arides de « Meridiani Planum » pour se diriger vers le cratère « Victoria » de 750 mètres de diamètres, qui se trouve à plus de 2 km plus au sud. Le rover franchit son septième kilomètre au Sol 774, et s'arrête près de l'affleurement « Brookville » entre les Sols 803 et 806, ou il entame une nouvelle série d'analyse avec un brossage sur la roche au Sol 804 avant de repartir vers le sud le 2 mai au Sol 807. Opportunity parcourt 200 mètres en 11 Sols et arrive à la hauteur de l'affleurement rocheux « Cheyenne » entre les Sols 818 et 821, ou il effectue un nouveau brossage et une nouvelle série d'analyse. Les bords du cratère « Victoria » composé de falaises abruptes d'une hauteur de plus de quinze mètres, commencent déjà à faire leurs apparitions sur l'horizon sud. Le rover effectue par la suite des tests de télécommunication radio avec la sonde Mars Odyssée au Sol 812 et sur le Sol 822, dans le but de préparer l'orbiteur à l'arrivée de la sonde Phœnix en mai 2008 (voir le chapitre consacré à Phœnix). Puis, Opportunity se dirige vers l'affleurement « Alamogordo Creek » entre les Sols 826 et 828 (Figure 55:b), ou il photographie à nouveau des myrtilles sur le sol qui ont des diamètres plus petits que ceux qu'il a rencontrés à proximité des cratères d'impacts. Le rover subit à nouveau l'ensablement sur le Sol 834 le 29 mai, au moment où les roues de l'astromobile s'enlisent dans le sable fin d'une dune baptisé « Jammerbugt » (Figure 56). Après huit jours d'effort, le robot réussit à se dégager de sa mauvaise posture en faisant marche arrière sur trois mètres au Sol 841 (6 juin), évitant ainsi de répéter le cauchemar qu'il a vécu onze mois plus tôt près de la dune « Purgatory ».

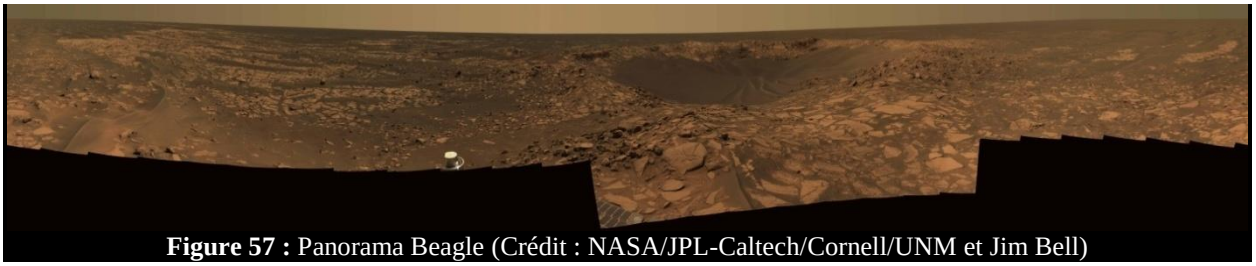


Figure 57 : Panorama Beagle (Crédit : NASA/JPL-Caltech/Cornell/UNM et Jim Bell)

Figure 58 : L'affleurement Baltra au Sol 894 (Crédit : NASA/JPL-Caltech/Cornell & USGS)

Le robot franchit le cap de son huitième kilomètre parcouru à la surface de la planète Mars au Sol 849 le 14 juin. Et une semaine plus tard, il commence à recevoir des nouvelles mises à jour de ses logiciels de navigation entre les Sols 852 et 879 à la hauteur du petit cratère « Waco » d'environ dix mètre de diamètre. L'astromobile entame l'étude de l'affleurement « Joseph Mckoy » entre les Sols 886 et 891, puis le robot tourne ensuite vers l'est pour parcourir une courte distance de 55 mètres en direction du cratère « Beagle », ou il s'arrête de nouveau pour faire l'étude et l'analyse de l'affleurement « Baltra » entre les Sols 891 et 896

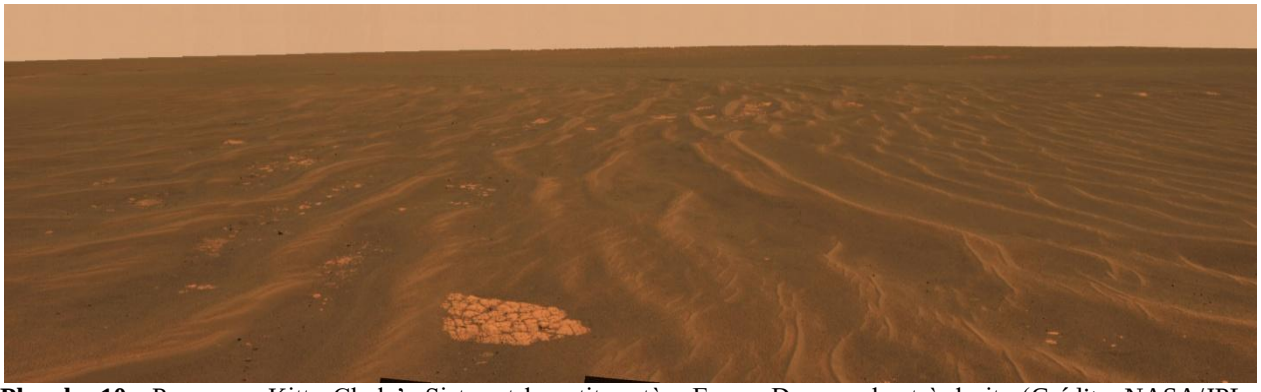


Planche 10 : Panorama Kitty Clyde's Sister et le petit cratère Emma Dean en haut à droite (Crédit : NASA/JPL-Caltech/Cornell/D. Savransky et Jim Bell)

Planche 11 : Panorama Cratère Victoria (Crédit : NASA/JPL)

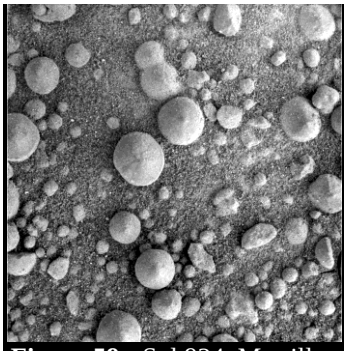


Figure 59 : Sol 924, Myrtilles (Crédit : NASA/JPL-Caltech/ Cornell/US Geological Survey)

(Figure 58). Le rover utilise pour la première fois depuis 193 Sols, soit depuis le 14 janvier 2006 (Sol 692), son outil d'abrasion RAT pour creuser un trou de 3 mm de profondeur sur la roche au Sol 893 le 30 juillet. Le rebot conduit de nouveau vers l'Est sur 21 mètres pour rejoindre le versant sud-ouest du cratère « Beagle » le 2 août au Sol 896. « Beagle » est un petit cratère d'impact de 25 mètres de diamètre situé à plus de 300 mètres au nord-ouest du cratère « Victoria », et qui présente un aspect physique plus jeune que celui du cratère d'impact « Eagle » où s'est posé le rover Opportunity en janvier 2004. Le cratère « Beagle » est entouré de débris rocheux éjecté lors de sa formation, et le fond de la cuvette du cratère est recouvert de petites dunes de sable érodées par le vent. Le rover profite de l'occasion pour entamer le vaste panorama couleur de 360° du cratère « Beagle » entre les Sols 901 et 904 (Figure 57), et assiste au passage de son deuxième solstice d'hiver martien sur le Sol 902 le 8 août (Winter Haven 2).

Opportunity poursuit sa route vers le cratère « Victoria » au Sol 907 sur un terrain qui est de plus en plus lisse et qui a la forme d'un anneau dénommé « Victoria Annulus », qui entoure le cratère « Victoria » sur plus de 590 mètres en moyenne. Le rover franchit le cap des 9 000 mètres parcourus à la surface de Mars au Sol 917, et creuse une nouvelle tranchée dénommée « Powell » sur le Sol 919 (25 août) qu'il analysera par la suite jusqu'au Sol 928 (Figure 59). L'astromobile

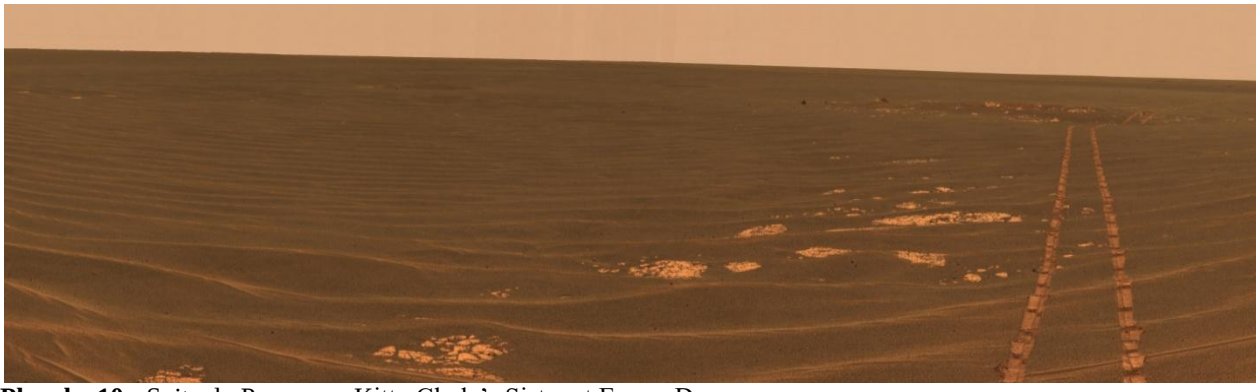


Planche 10 : Suite du Panorama Kitty Clyde's Sister et Emma Dean.

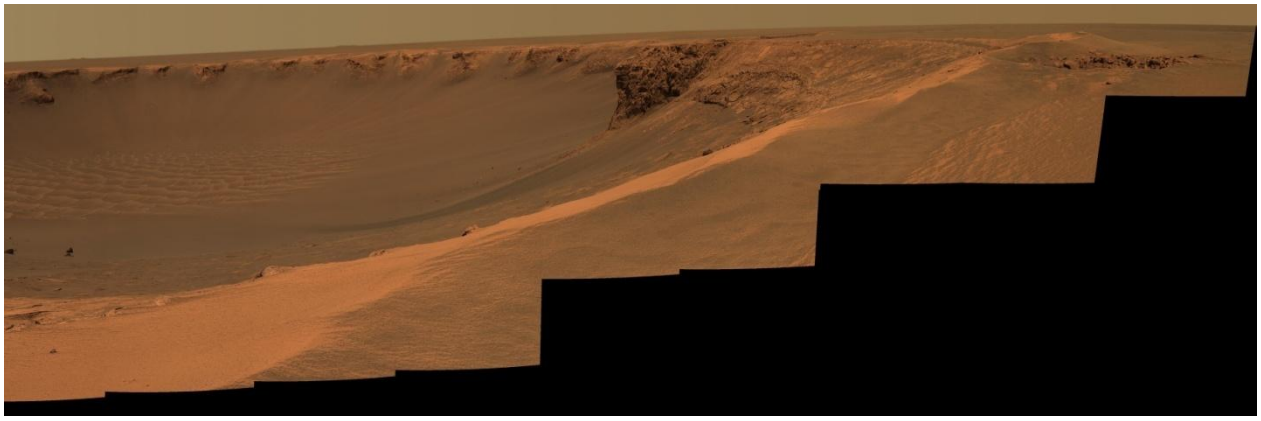


Planche 11 : Suite du Panorama Cratère Victoria.

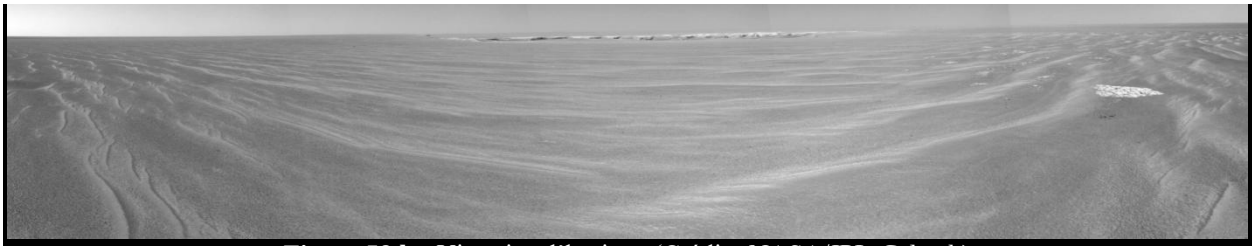


Figure 59 b : Victoria a l'horizon (Crédit : NASA/JPL-Caltech)

atteint le petit cratère « Emma Dean » d'une vingtaine de mètres de diamètre, après avoir parcouru une distance de 100,31 mètres au Sol 929 le 4 septembre, puis il prend une pause de deux semaines le temps d'étudier et d'analyser les environs. Opportunity s'est immobilisé à seulement cinq mètres du rebord nord-est du cratère, et entame l'étude des roches « Thompson » et « Jones » au Sol 938, de « Cap faraday » entre les Sols 939 et 941, de « Beaman » au Sol 940, et finalement de la cible sur le sol baptisé « Dellinbaugh » qui se trouve à l'intérieur de « Emma Dean » au Sol suivant. Le rover prend une série de photo de l'horizon en direction du cratère « Victoria » au Sol 943 le 18 septembre (Figure 59:b), puis il reprend la route vers le sud en passant devant la dépression circulaire « Kitty Clyde's Sister » d'une cinquantaine de mètres de diamètre (Planche 10). L'astromobile parcourt ensuite une centaine de mètres supplémentaires sur les Sols suivants, avant d'arriver finalement à l'entrée du cratère « Victoria » sur le Sol 952 le 28 septembre 2006. Le rover Opportunity a maintenant rejoint sa troisième cible d'intérêt géologique sur la planète Mars. Le flanc des parois internes des différents promontoires rocheux

Figure 59 c : Exemple de concrétion d'hématites au Sol 727 de la cible Panama Canal sur Roosevelt (Crédit : Hematite spherules at Meridiani: Results from MI, Mini-TES, and Pancam, December 2008)

qui bordent le contour du cratère « Victoria », d'une hauteur moyenne de six mètres, présente différents alignements de strates sédimentaires que le robot ne manquera pas d'étudier plus tard au cours de sa mission (voir le chapitre suivant). Le rover est maintenant stationné sur le bord nord-ouest du cratère « Victoria » juste à l'entrée de la baie « Duck Bay » (*Baie de Canard*), qui se trouve à une cinquantaine de mètres au sud du promontoire rocheux le plus proche baptisé « Cape Verde ». L'astromobile entame aussitôt un vaste cliché panoramique couleur des environs entre les Sols 952 et 953 (Planche 11).

Sur l'image de droite de la planche 11, on peut voir le petit cratère « Sputnik » et le promontoire rocheux « Cape Frio », et au centre de l'image on retrouve « Duck Bay » avec les dunes de sable qui recouvrent le fond du cratère, suivi à gauche du promontoire « Cape Verde ». Le cratère « Victoria » est situé à plus de 6 km de distance au sud du cratère « Endurance », et il est cinq fois plus gros que ce dernier et 40 fois plus gros que le cratère « Eagle ». Depuis le début de la mission sur Mars, soit depuis 2 ans 8 mois et 4 jours, le robot Opportunity a parcouru une distance totale de 9 279,34 mètres à la surface de la planète Mars jusqu'à maintenant. Ce qui constitue un véritable exploit et une véritable réussite technologique, si on pense aux 600 mètres de distance et aux 90 jours martiens (Sol) qui avait été initialement prévu pour toute la durée de la mission du rover sur la planète rouge. On peut reconstituer l'histoire de la succession des fines strates qui recouvrent la surface des affleurements rocheux rencontré dans les plaines de « Meridiani Planum », par un environnement de plage en saisons humide situé au bord d'une mer salé peu profonde avec de petite vague. Dont la source proviendrait d'une nappe phréatique qui monte et qui descend favorisant la formation de concrétions de billes d'hématites à travers des époques qui sont relié aux volcanismes, à la chute de gros astéroïdes ou aux changements de paramètre orbitale de la planète. Et lors des périodes plus sèches de plus longue durée, l'érosion éolienne favoriserait la formation des dunes et de l'épandage des petites billes d'hématite sur le sol.

L'ÉPOPÉE AUTOUR DE VICTORIA (Sol 953 à 1683)

Après avoir parcouru plus de 7 341 mètres en 21 mois dans les plaines sombres et désertiques de « Meridiani Planum » depuis le départ de l'astromobile du cratère « Endurance ». Opportunity entame sa nouvelle aventure sur la planète Mars à l'entrée du cratère « Victoria » à l'embouchure de la baie « Duck Bay ». Le rover qui s'est stationné à 3,7 mètres sur le bord du cratère depuis le Sol 952 le 28 septembre 2006, examine le magnifique paysage martien qui se trouve tout autour de lui. La paroi rocheuse qui encercle le contour du cratère « Victoria », d'une hauteur moyenne de plus de 75 mètres, est composée d'une alternance de promontoire rocheux espacée par de petites baies qui surplombent un plancher recouvert de petites dunes de formes ondulantes de quelques mètres de haut (Planche 12). La falaise la plus proche est « Cape Verde », il s'agit d'un promontoire rocheux de six mètres de haut qui se trouve à plus de 50 mètres au nord de la position actuelle du rover. Opportunity qui est stationné à 20 mètres au nord du petit cratère « Sputnik », d'environ cinq mètres de diamètre, se remet en route sur le Sol 955 vers le promontoire rocheux « Cape Verde ». Après un parcours de près de 98 mètres effectué aux Sols 954 et 957, l'astromobile effectue pour la première fois au Sol 957 (3 octobre) des observations atmosphériques conjointes avec la sonde orbitale américaine Mars Reconnaissance Orbiteur (MRO). L'orbiteur MRO qui s'est mis en orbite autour de la planète en mars 2006, profite de cette occasion pour photographier avec sa caméra de haute résolution Hirise le cratère « Victoria » et le robot Opportunity qui se déplaçait vers « Cape Verde » (voir la Planche 12).

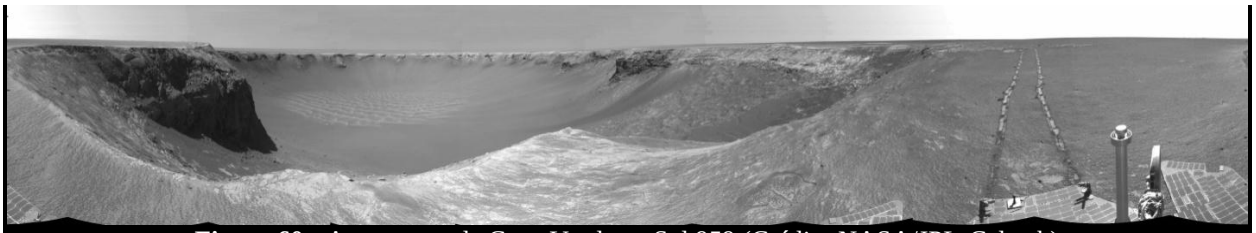


Figure 60 : Au sommet de Cape Verde au Sol 959 (Crédit : NASA/JPL-Caltech)

Le rover grimpe au sommet du promontoire « Cape Verde » au Sol 959 (Figure 60 et Planche 13), après avoir parcouru une distance de 71,9 mètres en 3 séances de conduite depuis le Sol 957, et s'arrête à 3,1 mètres du bord de la falaise près de la roche « Fogo ». Le robot Opportunity restera immobile durant toute la durée de la deuxième conjonction solaire qui aura lieu entre les Sols 970 et 984, soit du 16 au 30 octobre 2006. Durant la conjonction solaire d'une durée de deux semaines, l'astromobile entame une série d'analyse en mode automatique qui a été programmé à l'avance puis télécharger dans l'ordinateur de bord de l'astromobile avant la conjonction solaire. La première cible est « Cha » situé sur le pavé d'affleurement « Fogo » entre les Sols 960 et 992 (Figure 62:b), où le robot a effectué plus de 50 heures d'intégration avec le spectromètre Mössbauer, puis le rover se prépare ensuite à faire un vaste panorama couleur de la région (Planche 13). On peut voir à partir de la gauche sur les clichés de la figure 60 et de la

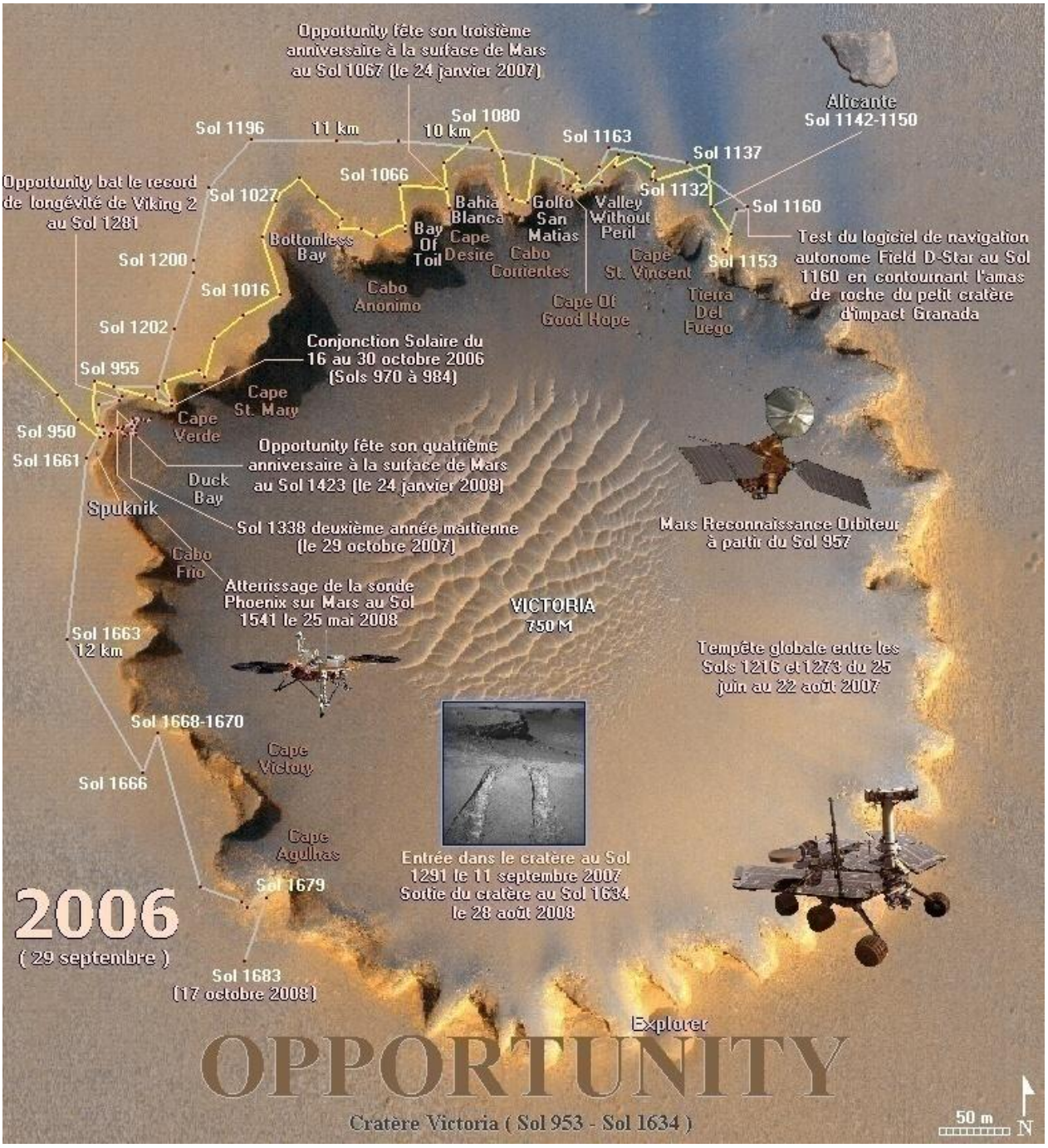


Planche 12 : Carte du trajet d'Opportunity entre les Sols 953 à 1683. La photo d'arrière-plan a été obtenue grâce aux données fournies par la caméra haute résolution Hirise de la sonde Mars Reconnaissance Orbiteur (MRO) le 3 octobre 2006. Position et trajet des rovers guidées par les cartes de la NASA, Phil Stooke et de Eduardo Tesheiner.

planche 13 : le « Cape St. Mary » qui est située à 40 mètres au nord du rover, suivit au centre par le « Cape Verde », et à droite des images on retrouve « Duck Bay » puis le promontoire « Cape Frio » qui est situé à 150 mètres plus loin. Le bilan d'énergie au début du mois d'octobre a été de 440 watts/heure. Avec un niveau d'énergie si bas, les planificateurs de la mission doivent programmer des activités quotidiennes restreintes à 3,5 heures par jours durant les deux semaines que durera la conjonction solaire.

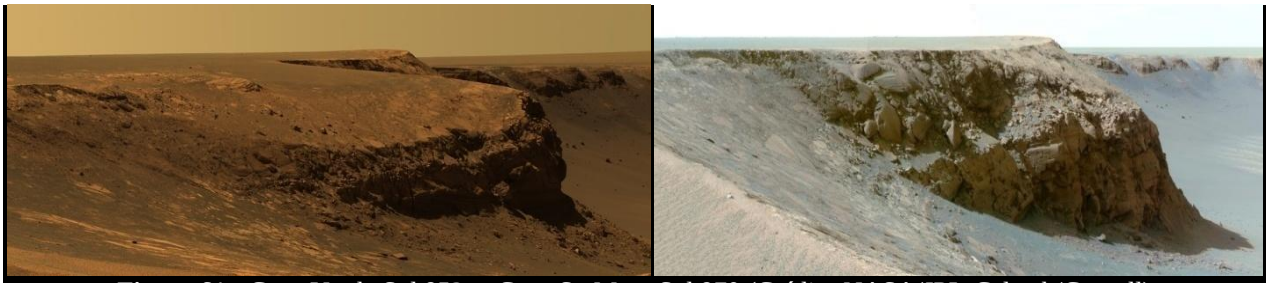


Figure 61 : Cape Verde Sol 952 et Cape St. Mary Sol 970 (Crédit : NASA/JPL-Caltech/Cornell)

Cape Cabo Anonimo Sol 1019 et Cape St. Vincent Sol 1167 (NASA/JPL-Caltech/Cornell & Damia Bouic à gauche)

Opportunity sort indemne de la conjonction solaire et se remet en route sur le Sol 992 vers le promontoire rocheux suivant dénommé « Cape St. Mary », qu’il atteint une semaine plus tard au Sol 999 après avoir parcouru une distance de 40 mètres (Figure 61). Le rover pivote ensuite vers le sud pour faire face aux strates sédimentaires qui se trouvent sur le flanc nord-est du promontoire « Cape Verde », dans le but d’amorcer leurs études aux Sols suivants. En procédant de la sorte, l’astromobile a accès aux différentes séries de strates sédimentaires qui composent les deux versants du promontoire rocheux, et qui pourrons être par la suite comparé dans leurs différentes analyses. Sur les Sols 1005 et 1006, le robot Opportunity participe aux efforts pour tenter de récupérer le signal radio de l’orbiteur Mars Globale Surveyor (MGS), qui a été perdu depuis le 5 novembre au Sol 992. Les tentatives de communication avec la sonde ont tousses échouées, et après avoir rendu 10 ans de loyaux services la sonde orbitale MGS fut officiellement déclarée perdue par la NASA le 21 novembre 2006. Le nouveau logiciel de navigation baptisé le planificateur de trajectoire « Field D-Star » (R9.2), téléchargé dans l’ordinateur de bord du rover entre les Sols 852 et 879, réussit son premier test de conduite sur le Sol 1014 sur un parcours d’essai de 10,5 mètres de long. Le logiciel développé par l’université Carnegie Mellon de Pittsburgh, permet désormais de planifier des itinéraires de plusieurs jours en mode de conduite autonome, incluant des trajectoires dynamiques de déplacement sur le terrain avec contournement d’obstacle sur une distance de plus de 50 mètres, contrairement à l’ancien mode de déplacement qui demandait des temps d’arrêt à chaque rencontre d’obstacle.

L’astromobile contourne le cratère « Victoria » par le nord-ouest dans le sens des aiguilles d’une montre, dans le but de trouver un point d’entrée sécuritaire qui serait plus favorable pour descente à l’intérieur. Durant le trajet, Opportunity explore les différents promontoires rocheux et les différentes baies qu’il rencontre sur sa route, tout en prenant soin de photographier et d’effectuer différentes études et analyses de terrain sur son chemin. La traversée du promontoire « Cape St. Mary » se poursuit sur une distance de 120 mètres entre les Sols 1009 et 1016, incluant un jour de repos entre chaque déplacement pour recharger les batteries du rover. Par la suite, l’astromobile reprend la route vers le nord pour contourner « Bottomless Bay » (*Baie sans*

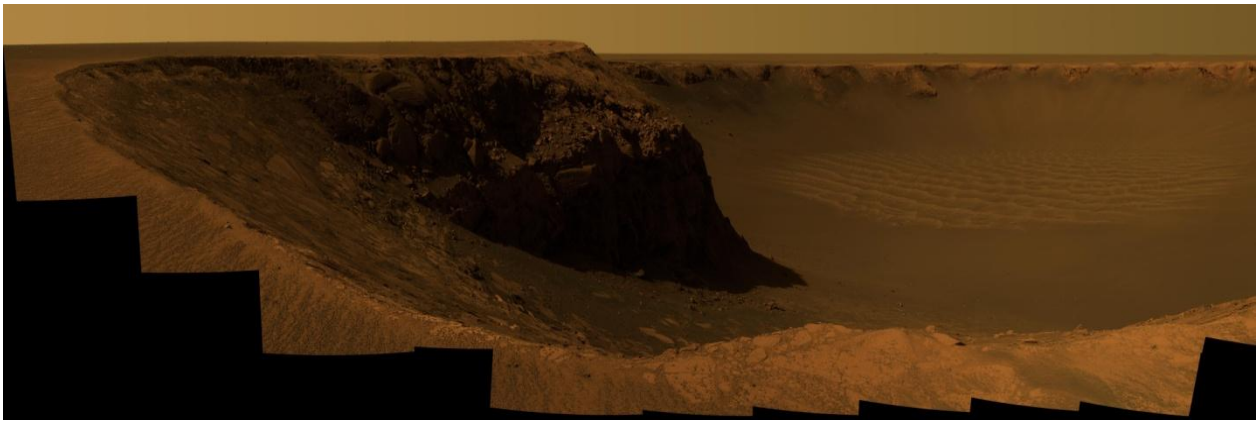


Planche 13 : Panorama Cape Verde (Crédit : NASA/JPL-Caltech/Cornell)

fond) entre les Sols 1021 et 1028, ou le rover franchit en une semaine une distance de 124,31 mètres. Deux magnifiques images son saisies dès le lendemain avec une myriade de myrtilles étendus sur le plancher du cratère (Figure 62). Ces deux images illustrent parfaitement les différents types de terrain recouvert de billes d'hématites rencontré par le rover lors de sa randonnée à travers les plaines sombres et désertiques de « Meridiani Planum ».

Figure 62 : Billes d'hématites recouvrant le sol du cratère (Sol 1029) (Crédit : NASA/JPL-Caltech/Damia Bouic)

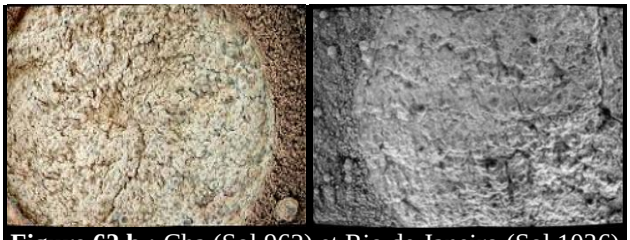


Figure 62 b : Cha (Sol 962) et Rio de Janeiro (Sol 1036) (Crédit : NASA/JPL-Caltech)

Le robot tourne à nouveau vers le sud-est en direction du promontoire « Cabo Animino », et parcourt 41 mètres jusqu'au Sol 1034. Le 22 décembre 2006 (Sol 1035), Opportunity brosse la surface de la roche « Rio de Janeiro » dans le but d'évaluer le nouveau logiciel de déploiement automatique du bras lors du positionnement des instruments scientifiques sur des cibles d'intérêt géologique. Le rover en profite également pour effectuer une campagne d'analyse complète de la roche « Rio de Janeiro » jusqu'au Sol 1039 (Figure 62:b). La randonnée martienne se poursuit par la traversée du double promontoire rocheux « Cabo Animino » entre les Sols 1039 et 1060, long d'une quarantaine de mètres environ, et durant laquelle le rover analyse la roche « Santa Catarina » qui ressemble à une météorite entre les Sols 1041 et 1055. Après avoir examiné les pavés d'affleurements qui se trouvent à proximité, l'astromobile se déplace d'une quarantaine de mètres vers le nord-est pour contourner « Bay of

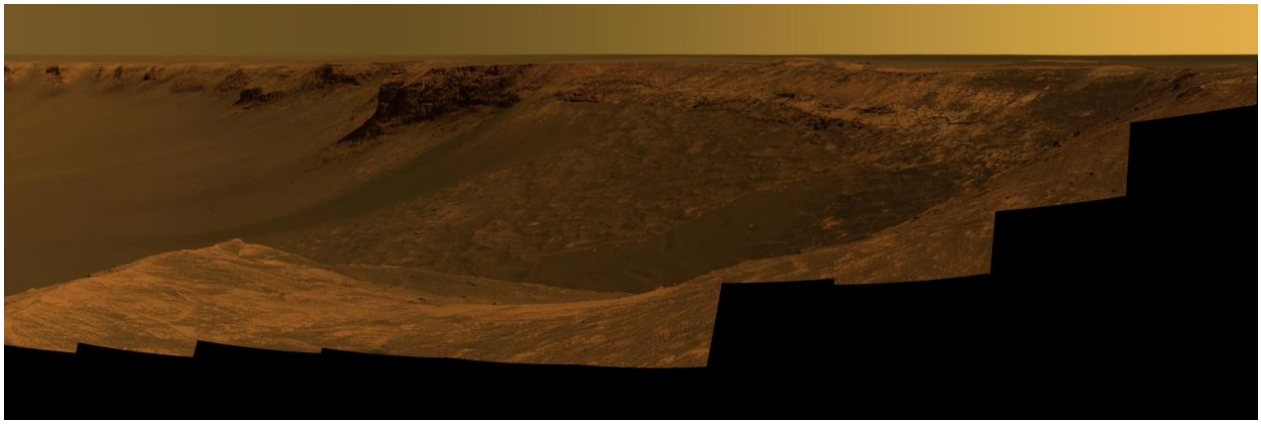


Planche 13 : Suite du Panorama Cape Verde (Crédit : NASA/JPL-Caltech/Cornell)

Figure 63 : Guadarrama et Madrid (Crédit : NASA/JPL-Caltech/Cornell)

Toil » (*Baie du Labeur*) entre les Sols 1061 et 1067 (Figure 63:b). Durant le trajet le rover fête son troisième anniversaire à la surface de la planète Mars le 24 janvier 2007 sur le Sol 1067. Opportunity se dirige ensuite vers le sud-est en parcourant une courte distance de 16,4 mètres pour rejoindre le promontoire rocheux baptisé « Cape Desire » au Sol 1071. Le robot contourne ensuite la Baie « Bahia Blanca » entre les Sols 1075 et 1094, durant lequel il franchit son dixième kilomètre au Sol 1080 le 6 février 2007, soit deux jours avant l'arrivée officielle de l'équinoxe du printemps dans l'hémisphère sud de la planète. Après un parcours d'environ 176 mètres effectué en six séances de roulement, Opportunity rejoint le sommet du promontoire « Cabro Corrientes » au Sol 1095. Le rover contourne ensuite la Baie « Golfo San Matias » entre les Sols 1096 et 1105 en parcourant 110 mètres supplémentaires, avant de faire une escale de trois jours au sommet du promontoire « Cape of Good Hope » (*Cape de Bonne-Espérance)* entre les Sols 1105 et 1107. Durant cette courte pause, l'astromobile en profite pour étudier les gros rochers « Madrid » (au centre de la figure 63) et « Guadarrama » (au-dessus de « Madrid ») qui se trouve juste au bord du cratère, et que le rover a photographiée pour la première fois au Sol 1097 le 24 février 2007 (Figure 63).

Figure 63 b : Sol 1063 entre Cabo Anonimo et Bay of Toil (Crédit : NASA/JPL/Cornell/James Canvin)

L'astromobile se déplace ensuite sur une distance de 110 mètres vers l'embouchure de la Baie dénommée « Valley Without Peril » (*Vallée sans Péril*) entre les Sols 1108 et 1129, et passe du même coup sur le versant nord-est du cratère « Victoria ». Opportunity entame jusqu'au Sol 1133 le 1er avril 2007, une vaste campagne d'analyse de la première traînée de matière sombre qui se trouve étendue sur le sol martien, et dont les points de sortie se retrouve à l'embouchure de plusieurs baies située dans la région nord du cratère. Les trainées de matière sombres visible dans

la région nord du cratère « Victoria », résulte de l'érosion éolienne des vents dominants qui fait sortir de la matière enfoui plus profondément dans le cratère via les baies (voir planche 12). Le rover reprend la route vers le promontoire « Tierra Del Fuego », en contournant le promontoire « Cape St. Vincent » par le nord-est sur une distance de plus de 55 mètres entre les Sols 1134 et 1137. L'objectif est de rejoindre une deuxième traînée de matière sombre étendue sur le sol martien et de l'étudier jusqu'au Sol 1141. Le promontoire rocheux « Cape St. Vincent » est une falaise de douze mètres de haut, dont la base présente des strates inclinées composées de dépôts de sable sédimentaire qui dévoile l'ancienneté des dunes à cet endroit. Sur la dernière image de la figure 61, on peut voir une bande de roche sédimentaire de teinte claire qui se trouve sur le flanc nord-ouest de la falaise « Cape St. Vincent ». Cette mince couche de matière claire qui encercle tout le flanc intérieur du cratère « Victoria », semble avoir été le socle ou reposaient autrefois les dunes et les pavés d'affleurements rocheux des plaines environnantes. Et qui auraient été altérées par l'eau lors de la débâcle causée par l'ouverture de « Valles Marineris » à une époque très ancienne, avant d'être dégagée plus récemment par la collision de la météorite qui a créé le cratère. Ce scénario nous indique que l'eau aurait cimenté les poussières en surface pour donner les pavés d'affleurement riche en soufre et en hématite, dont la formation remonterait à l'époque de la formation du Dôme de Tharsis. Et que l'érosion éolienne aurait recouverts par la suite tout en érodant les roches sur une très longue période de temps, pour finalement dégager les billes d'hématite que l'on retrouve partout sur le sol de « Meridiani Planum ».

Figure 63 c : Granada (Crédit : NASA/JPL-Caltech/Cornell)

Opportunity reprend la route vers le sud-est au Sol 1142 en longeant le versant nord-est du cratère sur 31,23 mètres, puis s'arrête près d'une cible de roche baptisée « Alicante » et entame une nouvelle série d'analyse d'une dizaine de jours jusqu'au Sol 1150. L'astromobile poursuit ensuite sa route vers le sud en direction du sommet du promontoire rocheux suivant baptisé « Tierra Del Fuego », que le robot atteint 60 mètres plus loin sur le Sol 1153. Le rover ne va pas aller plus loin dans son exploration autour du cratère « Victoria ». Après avoir parcouru plus du quart de sa circonférence sur plus de 1 230 mètres depuis son arrivée au bord du cratère au Sol 952, Opportunity rebrousse chemin vers le nord-ouest sur le Sol 1155 pour se diriger vers « Duck Bay » (*Baie des canards*), qui reste le meilleur endroit pour effectuer une tentative de descente vers le plancher du cratère, et ceci dans le but d'aller étudier les différentes strates de roches sédimentaires qui composent ses parois internes. Dans la dernière semaine du mois d'avril, les panneaux solaires du rover ont subi trois événements de nettoyage par des rafales de vent qui ont fait grimper la production d'énergie électrique à plus de 848 watts/heure au Sol 1160 le 29 avril, ce qui n'avait pas été vu depuis le Sol 18 de la mission. Le robot test de nouveau son logiciel de navigation autonome « Field D-Star » en contournant sur quinze mètres l'amas de roche du petit cratère d'impact « Granada » (Figure 63:c), avant de repartir vers le nord-ouest au Sol 1162 en direction du promontoire « Cape Of Good Hope » (*cape de Bonne Espérance*).

Opportunity en profite pour effectuer une nouvelle campagne d'étude de longue durée du promontoire rocheux entre les Sols 1164 et 1184, où le robot brosse (Sol 1166) et creuse dans la roche (Sol 1168) pour analyser la surface du pavé d'affleurement « Viva La Rata » (*vivre la RAT*)

Figure 64 : Viva La Rata (Crédit : NASA/JPL-Caltech/Cornell) Cercedilla-Penota (Crédit : NASA/JPL-Caltech/Cornell/Stuart Atkinson)

entre les Sols 1166 et 1169 (Figure 64), tout en effectuant durant les jours suivants différents observations sur les affleurements rocheux qui se trouvent à proximité. L'astromobile rencontre pour la deuxième fois sur sa route les roches « Madrid » et « Guadarrama », et s'arrête pour amorcer une seconde campagne d'étude des rochers et du terrain environnant entre les Sols 1170 et 1175. Une vaste campagne d'étude est amorcée sur la roche « Cercedilla » entre les Sols 1175 et 1184, incluant le brossage de la cible de surface dénommée « Penota » au Sol 1178 suivit d'une première séance de broyage au Sol 1180 et d'une seconde sur le Sol 1182 (Figure 64:b). Le rover reprend la route vers l'ouest au Sol 1184, et franchit une semaine plus tard sur le Sol 1194 (2 juin) le cap de son onzième kilomètre parcouru à la surface de Mars, puis l'astromobile redescend vers le sud en direction de « Cape Verde » au Sol 1196. Le cinquième et dernier test du logiciel de navigation « Field D-Star » est accompli avec succès quatre jours plus tard sur le Sol 1200. Opportunity reprend aussitôt la route vers le sud en parcourant 188 mètres jusqu'au Sol 1204, avant de tourner vers l'Est pour rejoindre le sommet du promontoire « Cape Verde » au Sol 1212. L'astromobile s'est stationné au même endroit sur le bord de la falaise du promontoire rocheux que neuf mois plus tôt, c'est-à-dire à l'endroit ou il s'était garé entre les Sols 959 et 991 lors de la conjonction solaire du mois d'octobre 2006.

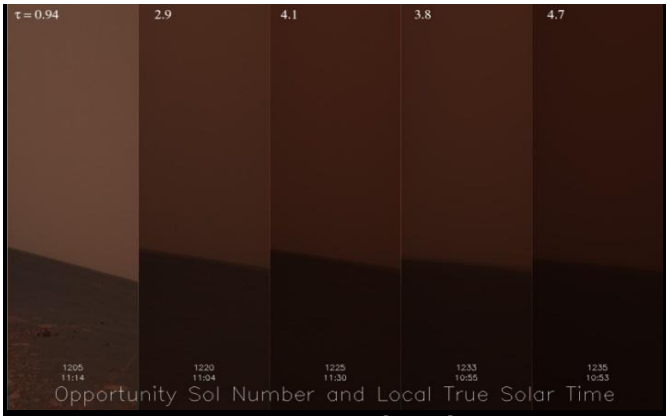


Figure 65 : Facteur Tau entre les Sols 1205 et 1235 (Crédit : NASA/JPL-Caltech/Cornell)

Le robot Opportunity reprend la route vers l'ouest au Sol 1214 pour rejoindre « Duck Bay », mais il doit s'arrêter deux jours plus tard à cause de l'arrivée d'une tempête de poussière estivale en provenance de l'hémisphère sud de la planète, et qui prend des proportions globales à partir du Sol 1216 le 25 juin 2007. Le facteur Tau est passé de 0,94 au Sol 1205 à plus de 4,7 sur le Sol 1235 le 16 juillet (Figure 65). Les poussières en suspensions dans l'atmosphère de la planète obscurcissent le soleil à plus de 99 %, et l'énergie électrique fournie par les panneaux solaires passe de 765 watts/heure au Sol 1205 à plus de 128 watts/heure le 18 juillet sur le Sol 1238. Il s'agit du plus bas taux d'énergie rencontré jusqu'à maintenant par les deux robots sur la planète Mars. Mais ce record sera battu plus tard par Spirit le 9 novembre 2008 avec seulement 89 watts/heure. La tempête de poussière globale se calme enfin le 22 août sur le Sol 1273, et les deux rovers ont survécu à cette dure épreuve. Opportunity entame une batterie de test et de diagnostic sur les Sols suivant, afin de vérifier l'état de fonctionnement de ses différents instruments scientifiques. Le bilan de santé du spectromètre

infrarouge (Mini-TES) n'est pas trop réjouissant, le miroir de son optique montre des signes de faiblesse depuis le début de la tempête, et semble être obstrué par une mince couche de poussière martienne qui le rend inutilisable. La lentille de la caméra PANCAM de droite est également recouverte par endroits de fine poussière, ce qui donne un aspect de brouillard sur les images.

Figure 66 : Trajet à l'intérieur de Duck Bay
(Crédit : NASA/JPL/University of Arizona)

Le rover se remet finalement en route entre les Sols 1271 et 1289 vers « Duch Bay », où il franchit une distance de 105 mètres avant de s'arrêter devant une pente de 20 degrés dénommer « Paolo's Plunge » située à l'entrée du cratère. Durant cette randonnée, l'astromobile bat à son tour le record de longévité de Viking 2 le 1er septembre 2007 sur le Sol 1281, qui est de 3 ans 7 mois et 7 jours. La face intérieure à l'entrée du cratère est tapissée d'un anneau de roche sédimentaire composée de trois bandes de couleurs claires situées à quelques mètres du sommet. La première couche très riche en soufre a été baptisée « Steno », la deuxième a été baptisée « Smith » et la dernière « Lyell » (Figure 66). Après avoir exploré les contours extérieurs du cratère depuis plus de 11 mois et demi, le robot Opportunity descend pour la première fois dans le cratère « Victoria » sur le Sol 1291 le 11 septembre 2007, et commence une vaste campagne d'analyse de l'anneau clair « Steno » à partir du Sol 1293. La puissance électrique est repassée au-dessus des 600 watts/heure entre les Sols 1309 et 1315, et le rover en profite pour effectuer différents brossages sur des cibles de roche se trouvant sur les pavés d'affleurements à proximité.

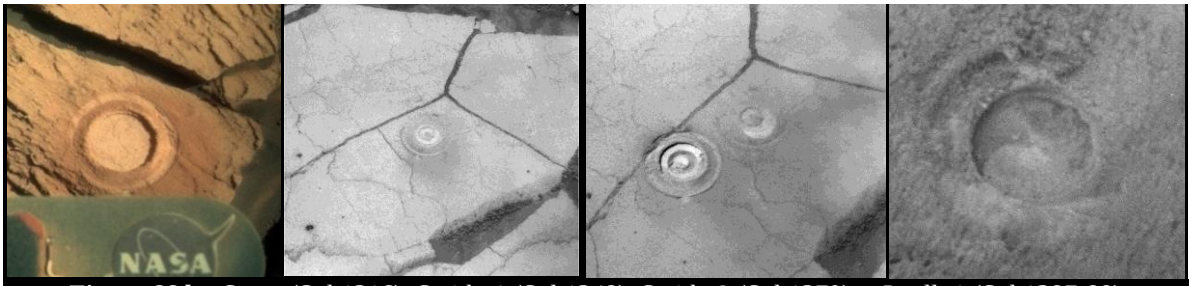


Figure 66 b : Steno (Sol 1316), Smith_1 (Sol 1348), Smith_2 (Sol 1370) et Lyell_1 (Sol 1387-88)
(Crédit : NASA/JPL-Caltech/Cornell/ et Stuart Atkinson (l'image de gauche)

La séance d'étude débute avec « Steno » entre les Sols 1307 et 1320, incluant une séance de brossage pour nettoyer la surface du pavé d'affleurement au Sol 1313 et du broyage au Sol 1316 (Figure 66:b). Les analyses effectuées par les spectromètres Mössbauer et APXS exigent désormais des temps d'exposition et d'intégrations de plus en plus longues échelonnées sur plusieurs jours. La source radioactive du spectromètre Mössbauer s'épuise beaucoup plus rapidement que la source de curium 244 du spectromètre APXS, qui a une durée de demi-vie de 18 ans contre seulement 271,8 jours pour le cobalt 57 utilisée par le spectromètre Mössbauer. Les temps d'intégration sont désormais de 50 à 60 heures pour le spectromètre Mössbauer et d'une dizaine d'heures pour le spectromètre APXS, comparé aux quelques heures seulement au début de la mission pour effectuer le même travail. Opportunity se déplace vers le bas de quelques mètres pour rejoindre la couche « Smith » entre les Sols 1327 et 1382, où il entame l'étude du

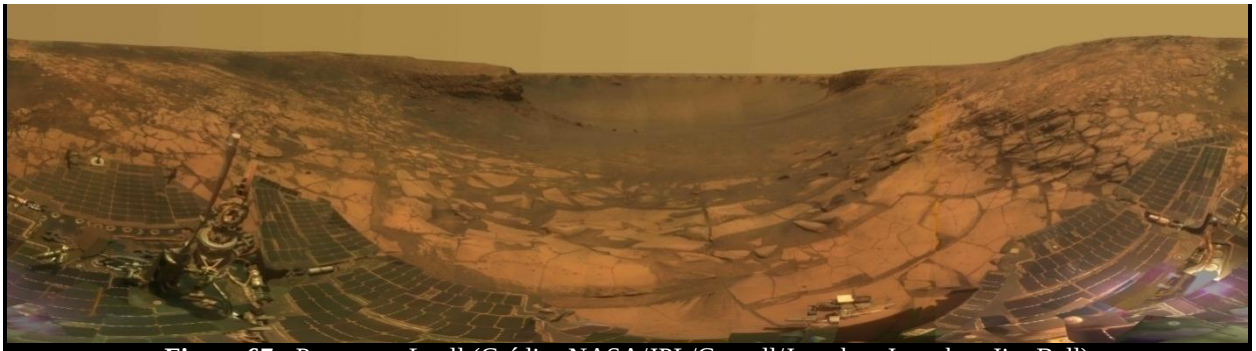


Figure 67 : Panorama Lyell (Crédit : NASA/JPL/Cornell/Jonathan Joseph et Jim Bell)

terrain en plus de prendre le magnifique panorama couleur de haute résolution « Lyell » entre les Sols 1332 et 1379 (Figure 67).

Le rover perd l'usage du deuxième encodeur de son outil d'abrasion RAT vers le Sol 1334, qui servait à lancer la foreuse vers les cibles géologiques et à faire tourner les palmes. Le premier encodeur qui servait de senseur et de télémétrie de contact n'a plus fonctionné depuis le Sol 1045 le 1er janvier 2007. Un nouveau mode d'opération de l'outil d'abrasion sera désormais utilisé à partir du Sol 1347. Il consiste à faire avancer la foreuse vers l'avant tout en contrôlant la résistance électrique du moteur qui fait tourner les palmes de la fraiseuse, afin de vérifier le contact avec les cibles d'intérêts géologiques avant de commencer à creuser. Entre temps, le rover fête sa deuxième année martienne sur le Sol 1338 le 30 octobre, et l'étude de l'afflerement rocheux se poursuit avec le broyage de la cible « Smith_1 » au Sol 1341, puis brossée en utilisant le nouveau mode d'opération au Sol 1348, et la deuxième cible sur le pavé d'affleurement dénommée « Smith_2 » est creusée sur le Sol 1370. L'automne fait son entrée officielle dans l'hémisphère sud de la planète sur le Sol 1378 le 9 décembre. Après l'étude des affleurements rocheux dans la bande « Smith », l'astromobile se déplace plus bas de six mètres au Sol 1382 le 13 décembre 2007 vers la couche plus foncée « Lyell ». Le robot brosse à deux reprises la cible « Lyell_1 » sur les Sols 1387 à 1388, et entame par la suite une longue séance d'intégration de plus de 70 heures sur la roche entre les Sols 1384 et 1399, soit du 16 au 31 décembre 2007.

Figure 68 : Cape Verde (Crédit : NASA/JPL-Caltech/Cornell University)

Figure 68 b : Buckland (1429) et Gilbert_RAT (1475) (Crédit : NASA/JPL-Caltech/Cornell)

Le rover descend encore plus profondément à l'intérieur du cratère à partir du Sol 1416 le 17 janvier 2008, ou il atteint les quinze mètres de profondeur. Opportunity effectue une longue campagne d'analyse d'une durée de trois semaines entre les Sols 1418 et 1438 (du 19 janvier au 9 février), incluant une séance de broyage sur le pavé d'affleurement « Buckland » au Sol 1429, tout en étudiant les pavés affleurements rocheux qui se trouvent aux alentours. Une semaine plus tard, l'astromobile fête son quatrième anniversaire à la surface de la planète Mars sur le Sol 1423 le 24 janvier 2008. Ensuite, c'est le tour du pavé « Gilbert » et des affleurements rocheux des alentours à subir une vaste campagne d'analyse d'une durée de cinq semaines (Sols 450-483), avec une séance de broyage sur la cible « Gilbert_RAT » au Sol 1475 le 18 mars 2008, ou les instruments du rover ont détecté une forte concentration d'hématite (Figure 68:b). Par la suite, Opportunity se déplace lentement vers l'Est en direction de « Cape Verde », ou il rencontre sur sa route un terrain qui est de plus en plus sablonneux qui fait progresser très lentement le rover sur une distance de 17,98 mètres en une semaine entre les Sols 1484 et 1491. Afin d'évaluer la traction sur le terrain, le robot laisse traîner l'une de ses roues sur le sol sablonneux au Sol 1491. Le joint azimutal du moteur de l'articulation de l'épaule du bras robotique, qui contrôle le mouvement de gauche à droite, cale de nouveau sur le Sol 1502 le 14 avril. Il s'agit du moteur qui contrôle le décrochage pour désarrimer le bras qui est rangé en position repliée durant la nuit, le bras sera désormais laissé en position déployé. Il s'agit du même problème qui a été rencontré pour la première fois sur le Sol 654 le 25 novembre 2005 à la hauteur du cratère « Erebus », et qui avait été causé par le bris d'un fil dans le moteur de l'articulation du bras (qui en contient cinq donnant six niveaux de liberté). Le rover restera immobile durant six semaines jusqu'au Sol 1547 le 31 mai, pour donner le temps aux ingénieurs de la NASA de faire des analyses et des tests plus approfondis sur le moteur du bras. Le problème n'étant toujours pas résolu sur le Sol 1542, la décision fut prise de laisser le bras déployer devant le rover pour le reste de la mission. Entre temps, Opportunity prend des images de la falaise « Cape Verde » et analyse les roches baptisées « Williams » et « Harland »..

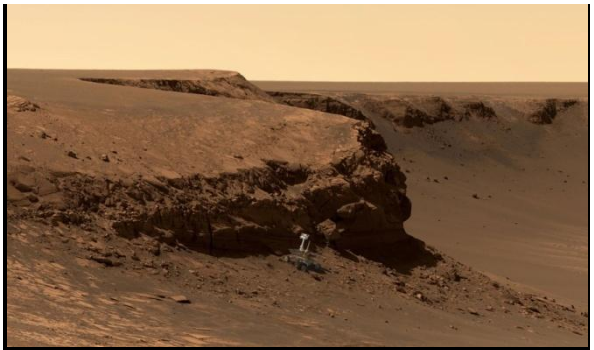


Figure 69 : Opportunity au Sol 1607 (Crédit : NASA/JPL/Cornell/Texas A & M/Rover model by D. Ellison/simulated view by Glen Nagle)

Le Sol 1541 est souligné par l'arrivée de la sonde Phœnix, qui s'est posée avec succès à la surface de la planète Mars le 25 mai 2008 (voir plus loin le chapitre qui est consacré à Phoenix). Le solstice d'hiver arrive officiellement un mois plus tard sur le Sol 1571 le 25 juin, où la puissance électrique fournie par les panneaux solaires redescend sous les 367 watts/heure. Le rover patine et glisse beaucoup en traversant un terrain qui est de plus en plus sablonneux à partir du Sol 1559, mais il finit par arriver au pied de « Cape Verde » au Sol 1584 le 8 juillet (Figure 69). Depuis son entrée dans le cratère, Opportunity a parcouru une distance de 168 mètres en 293 Sols avant de s'arrêter à sept mètres de distance des falaises de « Cape Verde » de six mètres de haut. Le rover profite de l'occasion pour entamer jusqu'au Sol 1612 une série d'étude et

d'analyse de la falaise, et pour compléter un panorama de haute résolution des environs avant de repartir vers la sortie dès le lendemain au Sol 1613.

Après une excursion de 11 mois et demie dans le cratère, l'astromobile rejoint finalement la sortie trois semaines plus tard sur le Sol 1634 le 28 août 2008 (Figure 70) en empruntant les mêmes traces qu'il avait laissées au sommet de la crête lors de son entrée au Sol 1291. Le pouvoir électrique a été excellent tout au long de l'ascension avec une moyenne de 621 watts/heure, et l'astromobile à bien supporter les températures hivernales martiennes qui ont été en moyenne de –95 °C la nuit et de –30 °C le jour. Les résultats des analyses ont démontré une hausse dans la concentration des chlorures et une baisse dans celle des sulfates de magnésium selon la profondeur des échantillons étudiés dans le cratère, et les myrtilles d'hématite étaient plus petites à l'intérieur du cratère qu'à l'extérieur. Ses résultats sont semblables à ceux qui ont été observés dans les cratères « Endurance » et « Eagle ». Ce qui semble vouloir indiquer que les processus géologiques qui ont participé à leur création et à leur formation étaient de grandeur régionale et non locale.

Figure 70 : La sortie au Sol 1634 (Crédit: NASA/JPL-Caltech)

Opportunity étudie pendant deux semaines les trois ensembles de pistes que le robot a laissées sur le sol depuis 2 ans à l'entrée du cratère, et entame par la suite une vaste séance d'étude de l'ondulation « Bagnold » et du pavé d'affleurement « Isle Royale » qui se trouve à proximité. Le rover étudie trois cibles sur le pavé « Isle Royale » ; soit « Schuchert » entre les Sols 1645 et 1647, « Drummond » au Sol 1649 et « Velvet » entre les Sols 1652 et 1655. Durant ce temps, le robot se déplace sur une courte distance en direction de l'ondulation de la dune « Bagnold » au Sol 1648, qui est composée de la plus pure couche de poussière qui a été rencontrée jusqu'ici sur la planète, dont l'objectif est d'atteindre une cible de teinte claire qui se trouve sur le sol de l'autre côté. Le rover doit cependant abandonner son projet après avoir échoué à deux reprises de traverser de l'ondulation de la dune au Sol 1652 et au Sol 1654. L'étude des différents affleurements exposés le long des promontoires et les baies situées toute autour du cratère « Victoria », permette de fournir une certaine interprétation sur l'évolution des différents processus qui ont opérés jadis à la surface de Mars. Les couches sédimentaires sont essentiellement composé de dépôts éolienne de dunes, avec l'absente de dépôt subaquatique comme observé aux cratères « Eagle », « Endurance » et « Erebus ».

Le robot se porte bien et une nouvelle cible d'intérêt géologique est sélectionnée pour la suite de la mission d'Opportunity sur Mars au Sol 1658 le 22 septembre. Il s'agit du grand cratère d'impact « Endeavour » de 22 kilomètres de diamètre sur 300 mètres de profondeur, qui se trouve à plus de 19 kilomètres de distance au sud-est du cratère « Victoria ». La mission ayant été prolongée pour deux ans, Opportunity va maintenant se diriger vers un cratère d'impact qui est 20 fois plus gros que le cratère « Victoria ». La randonnée de l'astromobile se poursuit sur le Sol 1659 le 23 septembre 2008, ou le rover amorce le contournement du flanc ouest du cratère « Victoria » dans le sens contraire des aiguilles d'une montre pour se diriger vers le sud. Le robot passe devant le petit cratère « Spuknik » au Sol 1661, et cinq jours plus tard il franchit le cap des 12 kilomètre parcourus à la surface de Mars avant de rejoindre le promontoire « Cape Victory »,

Figure 71 : Le départ du cratère Victoria au Sol 1683 (Crédit: NASA/JPL-Caltech)

que le rover étudie entre les Sols 1668 et 1673 du 2 au 7 octobre. L'astromobile atteint « Cape Agulhas » au Sol 1680 (14 octobre), et profite de cette pause de trois jours pour exécuter des tests sur l'optique du spectromètre infrarouge Mini-TES, en faisant vibrer le miroir avec de légères secousses dans l'espoir de dégager et de faire tomber quelques poussières qui bloquent le passage de la lumière vers les détecteurs infrarouges. Après avoir exploré plus de la moitié de la circonférence du cratère « Victoria » depuis deux ans et 20 jours. Le rover Opportunity quitte définitivement le cratère « Victoria » sur le Sol 1683 le 17 octobre (Figure 71) pour se diriger vers de nouvelle aventure.

DE VICTORIA AU CRATÈRE ENDEAVOUR (Sol 1683 à 2681)

Opportunity quitte le cratère « Victoria » au Sol 1683 le 17 octobre 2008, et se dirige vers le cratère « Endeavour » qui se trouve à plus de 19 kilomètres au sud-est. Le rover traverse l'anneau lisse de matière sombre « Victoria Annulus » entre les Sols 1683 et 1693, qui entoure le cratère sur près de 450 mètres à cet endroit. Cet anneau est composé d'une fine couche dure de matière éjectée recouverte de petites sphérules d'hématite, ce qui rend le sol plus ferme autour du cratère que les terrains recouverts de dunes des plaines environnantes, permettant ainsi au rover de parcourir des distances quotidiennement plus grandes. Sur le Sol 1691 (le 26 octobre), l'astromobile parcourt une distance de 216,19 mètres, battant ainsi presque son ancien record de 219,89 mètres établi trois ans et sept mois plus tôt sur le Sol 410 le 19 mars 2005. Deux jours plus tard sur le Sol 1693, le rover franchit le cap de son treizième kilomètre parcouru à la surface de la planète Mars, et sort de l'anneau « Victoria Annulus » pour rejoindre les pavés d'affleurements rocheux et les dunes qui recouvrent les plaines volcaniques de « Meridiani Planum ».

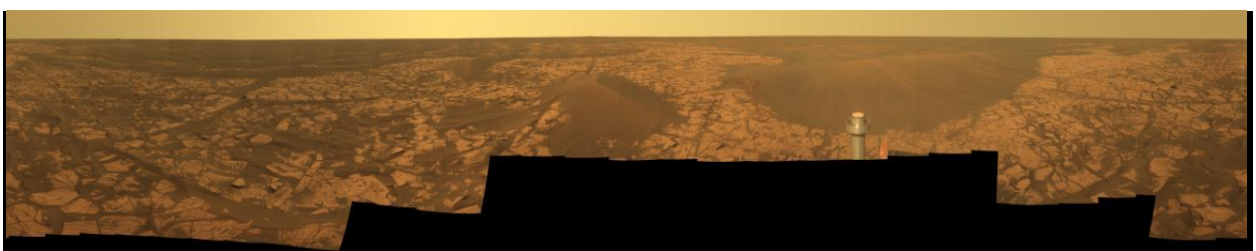


Figure 72 : Panorama Santorini (Crédit : NASA/JPL/Cornell/Jonathan Joseph et Jim Bell)

Le Sol 1699 est marqué par la fin de la mission de phœnix sur Mars. Deux semaines plus tard, Opportunity qui a parcouru plus de 1 253 mètres en six semaines depuis qu'il a quitté le bord du cratère « Victoria », rejoint le pavé d'affleurement « Santorini » sur le Sol 1713 le 16 novembre (Figure 72). Le robot se préparer ensuite à passer en mode automatique les deux semaines que durera la troisième conjonction solaire entre les Sols 1725 et 1740, soit du 30 novembre au 15 décembre. Le rover qui a perdu la possibilité de changer l'azimut de l'articulation de son épaule, qui contrôle le mouvement de déplacement latéral de gauche à droite du bras, doit désormais se positionner à l'avance devant ses cibles avec seulement 4 niveaux de liberté au lieu de 6, pour placer ses instruments scientifiques. L'astromobile s'arrête devant la roche « Santorini » au Sol 1714 (Figure 78), et place son spectromètre Mössbauer juste au-dessus de la roche pour préparer le rover à faire une longue séance d'intégration durant la conjonction solaire. Les communications avec le robot reprennent sur le Sol 1741 le 14 décembre 2008, et l'analyse de la roche « Santorini » d'origine météoritique, une mésosidérite composée de fer et de silicate, se poursuit jusqu'au Sol 1748. Le rover se tourne ensuite vers les cibles « Candia » et « Minos » qui se trouvent sur le pavé d'affleurement « Crète », afin d'entamer une nouvelle

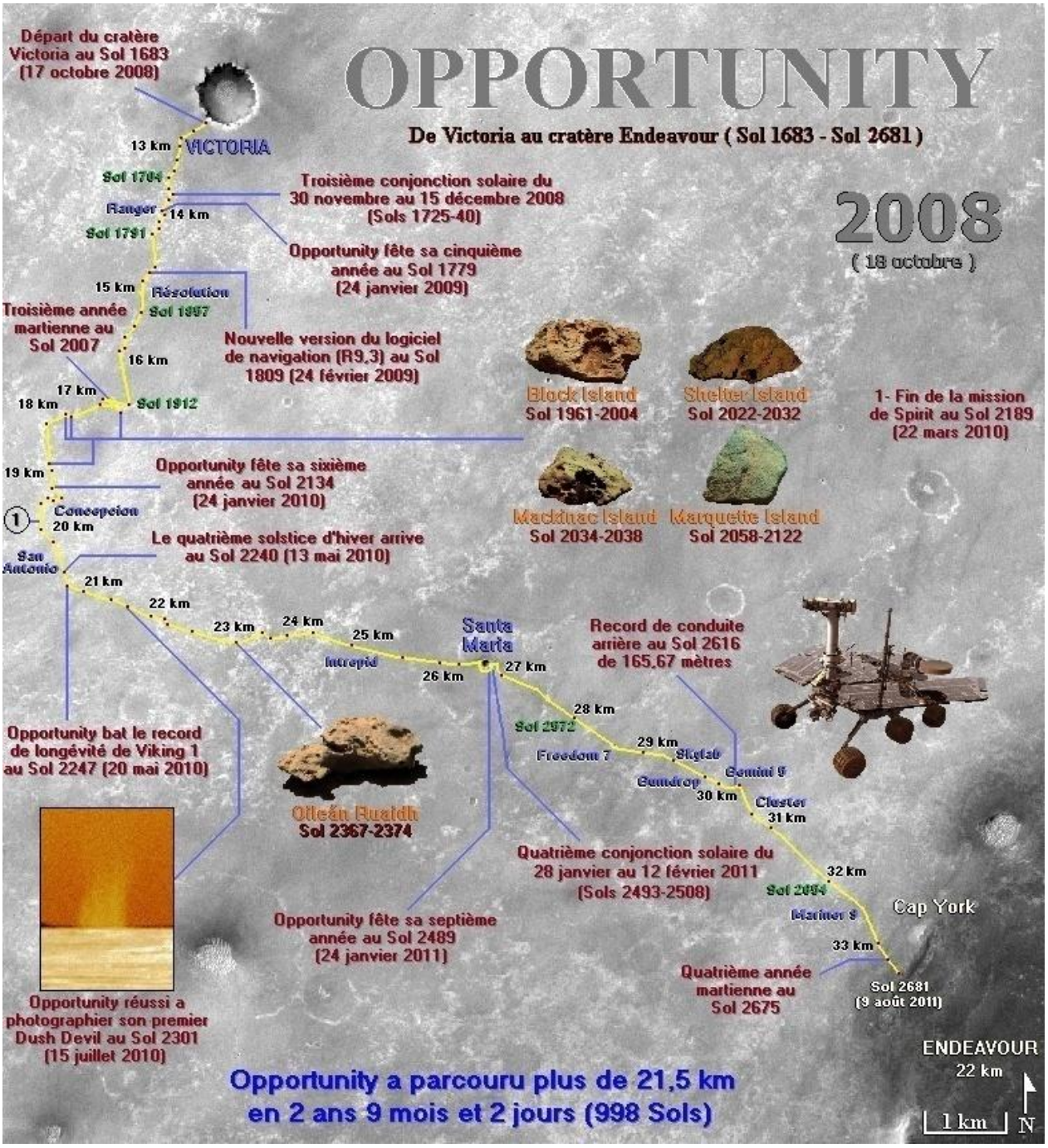


Planche 14 : Carte du trajet d'Opportunity entre les Sols 1683 et 2681. La photo d'arrière-plan a été obtenue grâce aux données fournies par la caméra CTX de Mars Reconnaissance Orbiteur (MRO) entre 2006 et 2010. Position et trajet des rovers guidées par les cartes de la NASA et de Eduardo Tesheiner.

campagne d'analyse de plusieurs jours entre les Sols 1751 et 1758 (du 26 décembre 2008 au 2 janvier 2009). Opportunity reprend la route vers le sud au Sol 1770 (15 janvier), et passe à l'Est du petit cratère « Ranger » d'une dizaine de mètres de diamètre au Sol 1776, où le robot s'arrête durant quatre jours pour étudier les environs. L'astromobile se déplace ensuite vers le petit cratère « Ranger » d'une dizaine de mètres de diamètre, et fête son cinquième anniversaire à la surface de Mars au Sol 1779 le 24 janvier 2009, puis il franchit son quatorzième kilomètre deux

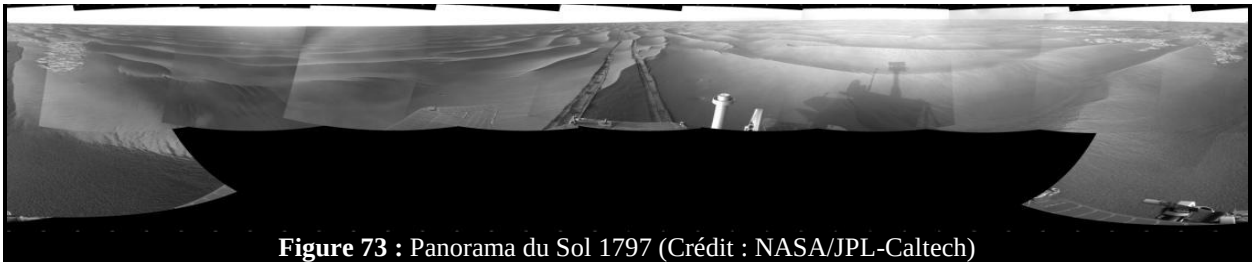


Figure 73 : Panorama du Sol 1797 (Crédit : NASA/JPL-Caltech)

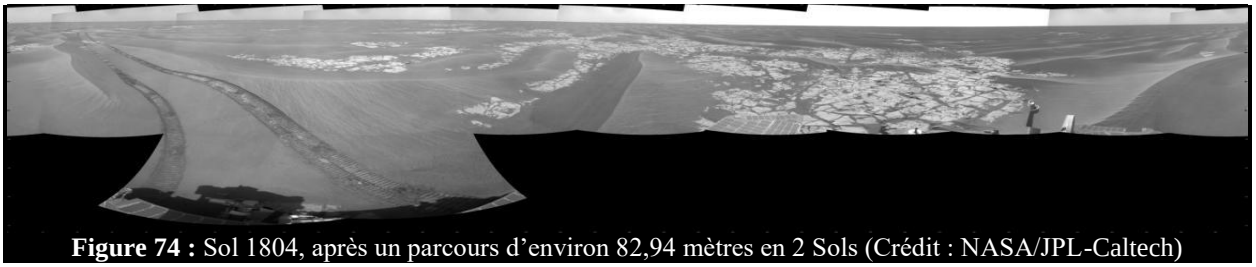


Figure 74 : Sol 1804, après un parcours d'environ 82,94 mètres en 2 Sols (Crédit : NASA/JPL-Caltech)

Figure 75 : Cook Island au Sol 1825, après un parcours de 278,03 mètres en 7 Sols (Crédit : NASA/JPL-Caltech)

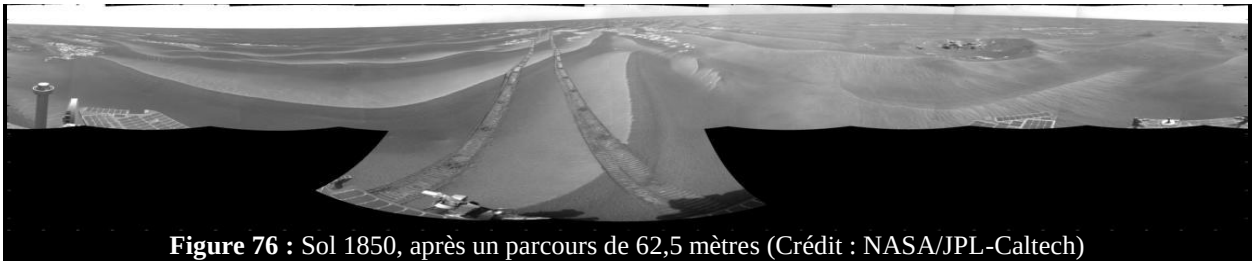


Figure 76 : Sol 1850, après un parcours de 62,5 mètres (Crédit : NASA/JPL-Caltech)

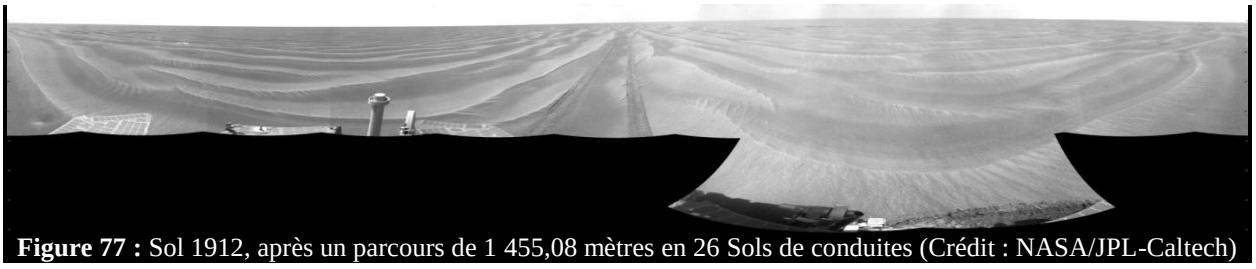


Figure 77 : Sol 1912, après un parcours de 1 455,08 mètres en 26 Sols de conduites (Crédit : NASA/JPL-Caltech)

jours plus tard sur le Sol 1782 après avoir dépassé le petit cratère « Surveyor ». Par la suite, Opportunity parcourt une distance de 599,21 mètres entre les Sols 1790 et 1806, dont une distance de 110,4 mètres sur le seul Sol 1797. Durant le trajet, le robot prend deux clichés panoramiques avec ses caméras de navigations qui montrent la progression de l'astromobile sur le terrain, comme si Opportunity naviguait à travers un océan de dunes (Figure 73 et 74). Le robot reçoit une nouvelle version de son logiciel de navigation (R9,3) au Sol 1811 le 26 février, qu'il testera ensuite cinq jours plus tard sur le Sol 1814 le 1er mars.

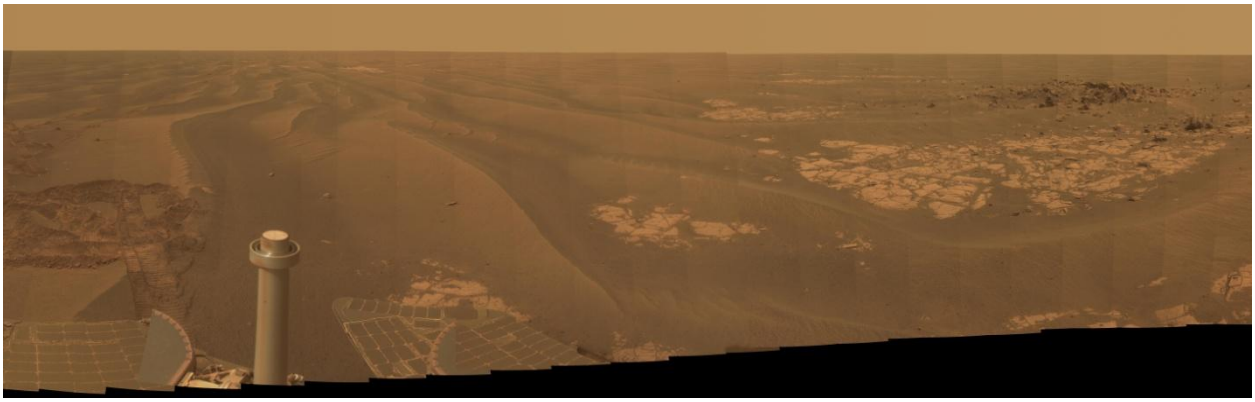


Planche 15 : Panorama Resolution (Crédit : NASA/JPL/Cornell/Jonathan Joseph & Jim Bell)

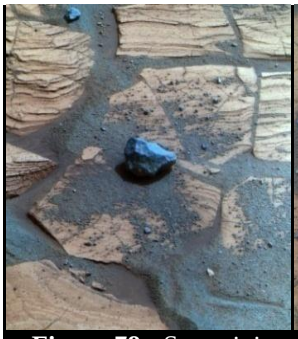


Figure 78 : Santorini

Figure 79 : Kasos

(Crédit : NASA/JPL-Caltech/Cornell)

Opportunity avance en marche arrière depuis le Sol 1798, pour mieux distribuer le lubrifiant dans la roue avant droite qui surchauffe, et qui offre une résistance de plus en plus forte depuis le Sol 1795. Le problème rencontré par la roue avant droite d'Opportunity, qui a déjà un actuateur défectueux depuis le mois d'avril 2005, a pour conséquence de coincer l'alignement de la roue de 7 degrés vers l'intérieur. Il s'agit du même genre de symptôme qui a été rencontré par la roue défectueuse du rover Spirit situé de l'autre côté de la planète. Le robot aperçoit pour la première fois le bord de la crête nord du cratère « Endeavour » au Sol 1820 (7 mars), qui commence déjà à faire son apparition sur la ligne d'horizon sud-est et qui se trouve à environ seize kilomètres de distance. Cinq jours plus tard au Sol 1825, Opportunity passe le cap de son quinzième kilomètre parcouru à la surface de Mars à la hauteur du petit cratère « Resolution » (Figure 75 et Planche 15), ou le robot entame dès le lendemain une série d'analyse de la cible « Penrhyn », qui se trouve sur l'affleurement « Cook Islands » jusqu'au Sol 1849 le 6 avril. Après avoir apporté et télécharger les correctifs logiciel pour contrôler l'erreur d'orientation de l'axe de rotation azimutale du bras robotique pour positionner la RAT sur sa cible. Le rover effectue pour la première fois depuis janvier 2009, une séance de brossage pour nettoyer la surface de la cible (Sol 1833) et une séance pour le broyage de la roche (Sol 1838) afin de creuser un trou d'une profondeur de 3 mm sur la cible « Penrhyn » (Figure 90 B:a). L'astromobile parcourt ensuite 140 mètres entre les Sols 1852 (Figure 76) et 1857 (du 9 au 14 avril), et passe à proximité de quatre petits cratères secondaires de quelques mètres de diamètre âgés d'environ 100 000 ans, soit « Adventure », « Discovery », « Rayleigh » et « Marquis ». Durant ce temps de l'autre côté de la planète Mars dans le cratère « Gusev », le rover Spirit s'enlise définitivement dans le sable fin de « Troy » (29 avril 2009).

Le robot parcourt 691,41 mètres en 16 Sols, incluant une distance de 119,6 mètres sur le seul Sol 1864, avant d'arriver près d'un petit amas de cailloux exposé sur un pavé d'affleurement rocheux sur le Sol 1873 (le 1er mai). Opportunity s'arrête devant l'amas de pierres et amorce une campagne d'analyse durant les deux semaines suivantes jusqu'au Sol 1890 (18 mai). Le rover bosse la surface et analyse les cailloux « Tilos Kos » et « Rhodes » de l'amas de pierres, puis il se déplace de six mètres vers un autre pavé pour analyser la roche « Kasos » entre les Sols 1884 et

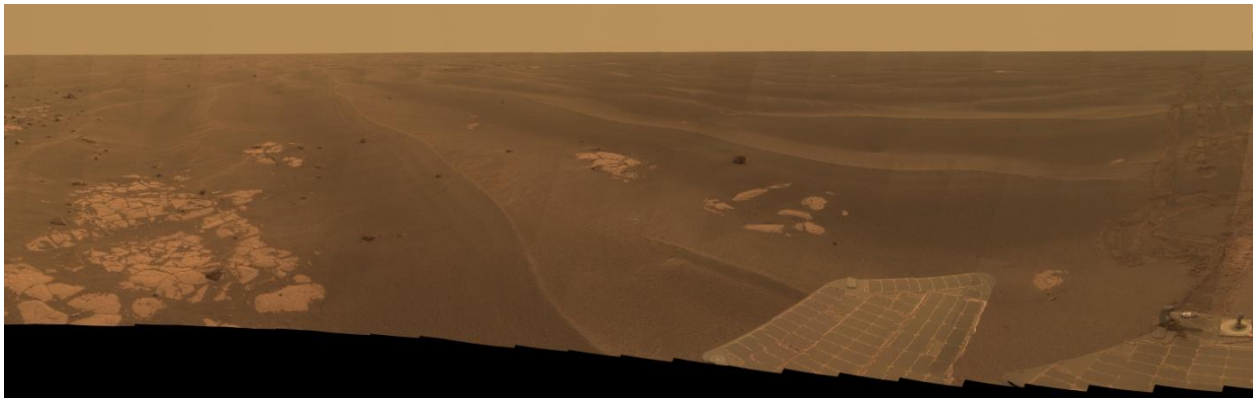


Planche 15 : Suite du Panorama Resolution

1891 (Figure 79). Après avoir parcouru 94 mètres en deux jours, le rover franchit son seizième kilomètre à la surface de Mars sur le Sol 1892, soit deux jours avant l'arrivée officielle du solstice d'été dans l'hémisphère sud de la planète au Sol 1894 (22 mai). L'astromobile doit maintenant se limiter à des randonnées d'un peu plus de 60 mètres par jours, afin de ne pas trop user la roue avant droite qui tire à l'occasion deux fois plus de courant que les autres roues. Opportunity doit également éviter le plus possible les dunes formées de sable basaltique et de petites sphérules de myrtilles, qui deviennent de plus en plus hautes au fur et à mesure qu'il progresse sur le terrain vers le sud.

Le rover parcourt une distance de 701,38 mètres en douze séances de roulement quotidien entre les Sols 1893 et 1927 (Figure 77), puis il s'arrête sur un grand pavé d'affleurement rocheux pour les deux semaines suivantes, le temps de faire quelques analyses de sol et d'étudier la roche « Absecon ». Par la suite, Opportunity reprend la route en tournant vers l'ouest sur le Sol 1942, dans le but de contourner un grand champ de dune qui se trouve au sud. Et alors qu'il était en route vers les cratères « Kaiko » et « Nereus » sur le Sol 1950 le 19 juillet (Figure 81). L'astromobile aperçoit au sud-est une météorite sombre de 70 cm de haut étendus sur le sol à plus de 250 mètres de distance. Le robot fait alors marche arrière et part à sa rencontre. Opportunity franchit le cap de son dix-septième kilomètre parcouru à la surface de la planète au Sol 1952, puis il effectue l'approche finale de la météorite baptisée « Block Island » (*Île de bloc*) au Sol 1961 le 31 juillet (Figure 80).

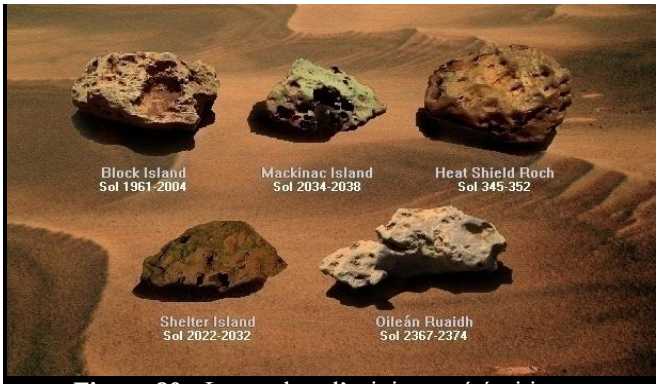


Figure 80 : Les roches d'origines météoritiques (Credit: NASA /JPL-Caltech/Cornell)

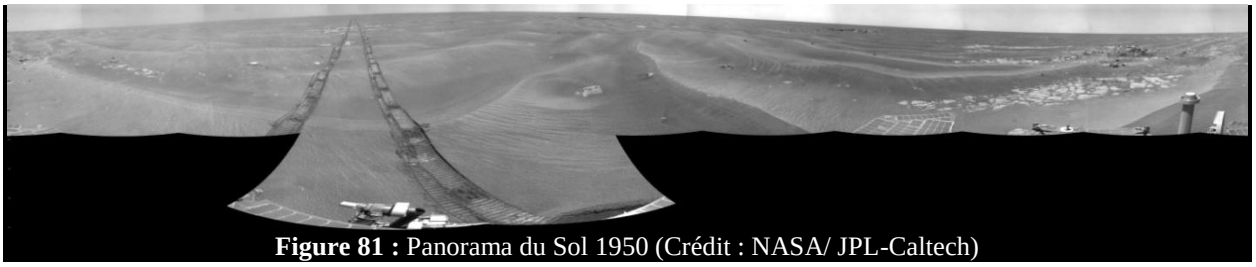


Figure 81 : Panorama du Sol 1950 (Crédit : NASA/ JPL-Caltech)

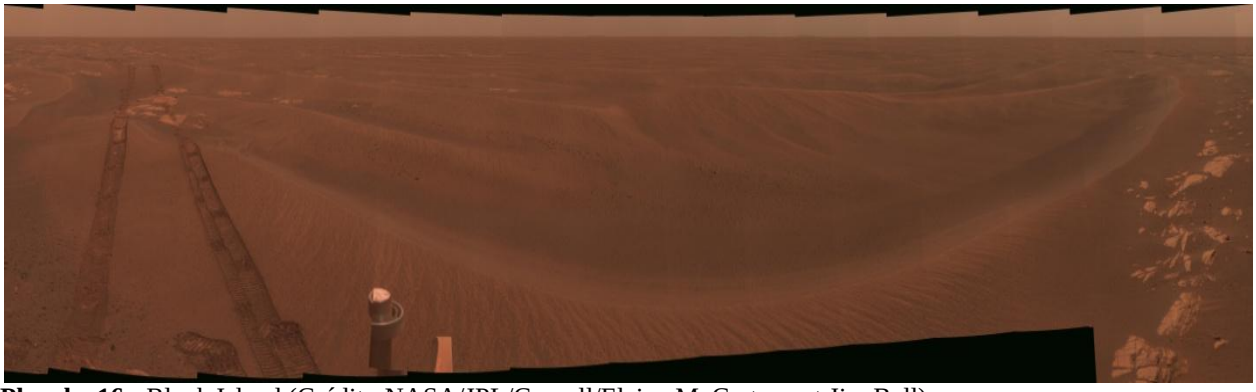


Planche 16 : Block Island (Crédit : NASA/JPL/Cornell/Elaina McCartney et Jim Bell)

Le robot prépare ses différents instruments et entame aussitôt une vaste campagne d'analyse de six semaines sur la météorite composée de fer-nickel jusqu'au Sol 2004 (le 10 septembre). Il s'agit de la plus grande météorite qui a été observée jusqu'ici à la surface de la planète rouge par les deux rovers, étant dix fois plus massive que la météorite « Heat Shield Roch » rencontrée près du bouclier thermique entre les Sols 345 et 352 de la mission. Opportunity reprend la route vers l'ouest au Sol 2004 et fête sa troisième année martienne quatre jours plus tard sur le Sol 2007 le 16 septembre 2009. Après avoir parcouru plus de 706,35 mètres en 10 séances de roulement quotidien, le rover arrive près d'une autre météorite baptisée « Shelter Island » de 47 centimètres de diamètre (Figure 80), que le robot étudie et analyse durant dix jours entre les Sols 2022 et 2032 (du 1er au 11 octobre). Après avoir passé une journée de repos pour recharger ses batteries, l'astromobile reprend la route sur le Sol 2034, et parcourt 64 mètres durant lesquels il franchit le cap de son dix-huitième kilomètre. Le robot s'est arrêté devant une troisième météorite qui a été baptisée « Mackinac Island » de 45,2 centimètres de diamètre (Figure 80), que le robot étudie et analyse durant quatre jours jusqu'au Sol 2037, avant de repartir vers le sud-ouest et de franchir 213 autres mètres en trois séances de roulement quotidien jusqu'au Sol 2041.

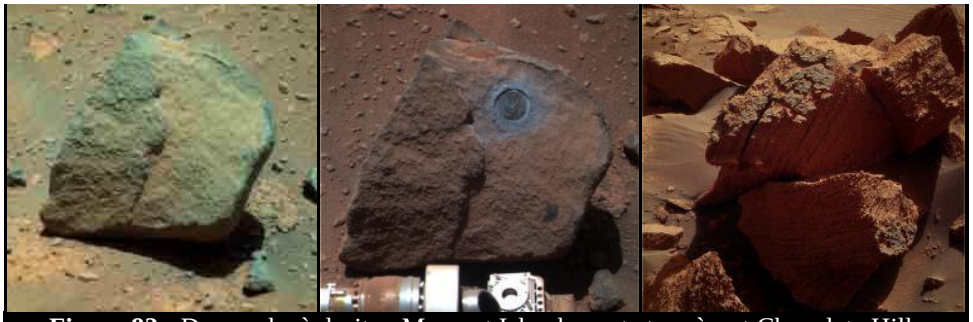


Figure 82 : De gauche à droite : Marquet Island avant et après, et Chocolate Hills (Crédit : NASA/JPL-Caltech/Cornell/Emily Lakdawalla, Jim Bell et Stuart Atkinson)

Opportunity met de nouveau le cap au sud et parcourt 540 mètres en deux semaines entre les Sols 2043 et 2056 du 23 octobre au 5 novembre 2009, où le robot assiste entre temps à l'arrivée de son quatrième équinoxe d'automne au Sol 2046 (le 26 octobre). Le rover parcourt ensuite quinze autres mètres avant de s'arrêter juste devant la roche baptisée « Marquette Island » sur le Sol 2063, qu'il étudie par la suite durant neuf semaines jusqu'au Sol 2122 le 12 janvier 2010 (Figure 82). Opportunity brosse et creuse à plusieurs reprises la cible dénommée « Peck Bay 2 » (*la Baie coup de bec*), pour dégager un trou d'une profondeur de 1,5 mm que les

Planche 16 : Suite du Panorama Block Island

instruments du rover analysent par la suite (Figure 90 B:b & B:c). Les analyses ont dévoilé que la composition minéralogique à l'intérieur du trou, était différente de celle qui avait été rencontrée à la surface de la roche avant le brossage. Il s'agit d'une roche riche en olivine, qui semble avoir été extraite des couches plus profondes de Mars lors d'une violente collision avec un gros météorite, ce qui la fait ressembler beaucoup plus à la roche « Bounce » rencontrée entre les Sols 63 et 70 au début de la mission. L'astromobile a parcourus 5 310.23 mètres durant toute l'année 2009 à partir du Sol 1756 (le 1er janvier) jusqu'au Sol 2109 (le 30 décembre), soit plus du tiers du kilométrage effectué jusqu'ici sur la planète. Le rover se remet en route entre les Sols 2122 et 2125, où il franchit en cour de route le cap de son dix-neuvième kilomètre parcouru à la surface de la planète Mars au Sol 2124 le 14 janvier 2010. L'astromobile poursuit sa randonnée sur les 14 Sols suivants et franchit 288,96 mètres supplémentaires en se déplacent qu'un jour sur deux le temps de recharger ses batteries, avant d'arriver sur le Sol 2138 le 28 janvier 2010 à proximité du plus jeune cratère rencontré jusqu'ici à la surface de la planète Mars, soit quatre Sols après avoir fêté son sixième anniversaire sur Mars au Sol 2134. Il s'agit du petit cratère « Concepción » de dix mètres de diamètre âgé seulement d'environ 1 000 à 100 000 années (Planche 17).

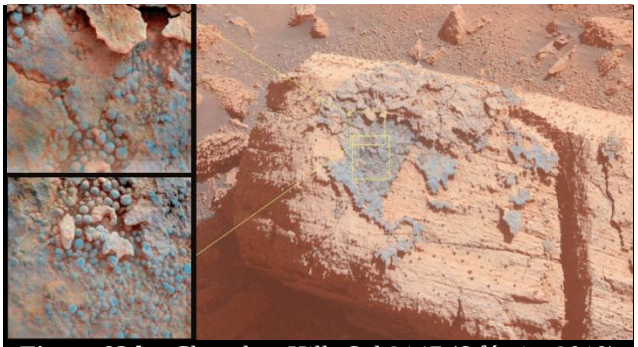


Figure 82 b : Chocolate Hills Sol 2147 (6 février 2010) (Credit: NASA /JPL-Caltech/Cornell)

La production d'énergie est tombée pour la première fois depuis la tempête globale de l'été 2007, sous le cap des 300 watts/heure au Sol 2136 avec un bilan d'énergie de seulement 296 watts/heure. Le facteur Tau qui mesure l'opacité atmosphérique a été au même moment de 0,458, et le facteur d'accumulation de poussière sur les panneaux solaire a été de 0,517. Ce dernier indique que seulement 51,7 % de la lumière disponible du soleil réussissaient à frapper les panneaux solaires du rover. Une semaine plus tard sur le Sol 2145, le rover contourne le cratère « Concepción » par le nord-est dans le sens des aiguilles d'une montre, dans le but de rejoindre dix mètres plus loin la roche « Chocolate Hills » (*Colline au Chocolat*). Une roche recouverte d'une couche plus sombre qui ressemble beaucoup à une fine couche de fusion de bille d'hématite (Figure 82:b) et que l'on peut voir perché sur le bord sud du cratère « Concepción » vers le centre de la partie inférieur gauche de la Planche 17. Sur le trajet, Opportunity doit faire très attention afin d'éviter de percuter les débris d'impacts rocheux riches en sulfates qui sont étendus sur le sol tout autour du cratère. Durant les semaines suivantes, le rover se prépare à étudier plusieurs cibles de couleur

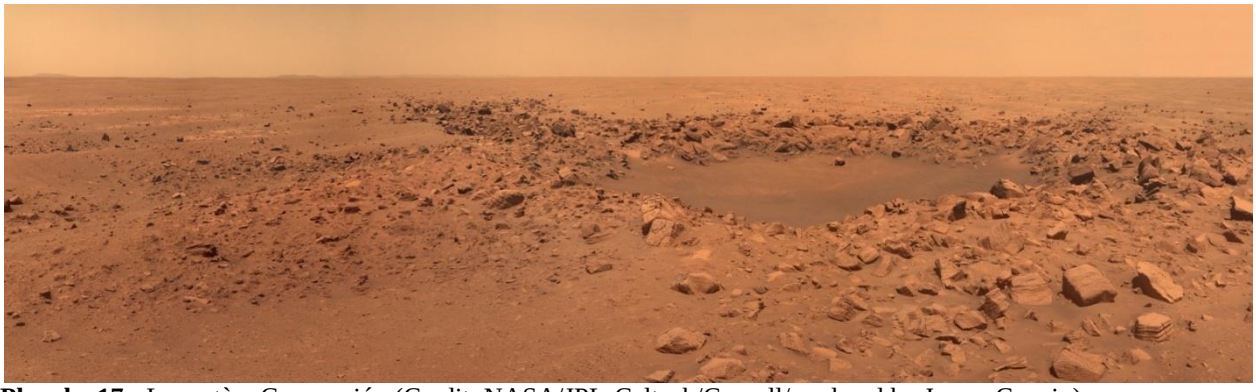


Planche 17 : Le cratère Concepción (Credit: NASA/JPL-Caltech/Cornell/rendered by James Canvin)

Figure 83 : Endeavour à l'horizon au Sol 2226 (Credit: NASA/JPL-Caltech/Cornell University/rendered by Damia Bouic)

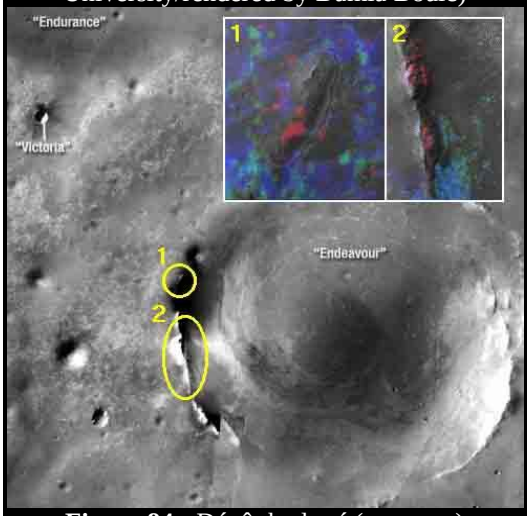


Figure 84 : Dépôt hydraté (en rouge) (Crédit : NASA/JPL-Caltech/U.A. et JHUAPL)

sombres et claires qui se trouvent sur la roche, dans le but de faire des études minéralogiques de comparaison jusqu'au Sol 2161. Le troisième et dernier test du logiciel d'exploration autonome « AEGIS » de la version « Field D-Star » (R9,3) du système de navigation des rovers, est effectué avec succès sur le Sol 2172 (4 mars). Ce logiciel d'intelligence artificielle donne la capacité au rover de se déplacer et de sélectionner de manière autonome des cibles qui se trouvent sur le sol martien, et de déterminer par la suite s'il faut prendre des photos des roches qu'il aperçoit lorsqu'il arrive à un nouvel endroit, et ceci, sans devoir attendre une confirmation venant de la terre.

L'astromobile quitte le cratère « Concepción » au Sol 2177 (9 mars) après avoir effectué six semaines d'étude et d'analyse sur différentes cibles, pour se remettre en route à travers un paysage sombre recouvert de dunes qui semblent datées de près d'un milliard d'années. Le rover parcourt ensuite 440,46 mètres entre les Sols 2179 et 2191, ou il franchit le cap de son vingtième kilomètre parcouru à la surface de Mars. Mais deux jours avant d'établir ce nouveau record sur le Sol 2189 le 22 mars 2010 de la mission d'Opportunity. Un événement très triste est survenu de l'autre côté de la planète dans le cratère « Gusev ». Le rover Spirit ne répond plus aux commandes, et sa mission sur Mars est maintenant terminée. Le plus vieux des deux rovers martiens de la mission MER n'a pas réussi à se dégager de son ensablement à « Troy », et le froid de l'hiver martien lui aura été fatal.

Après avoir parcouru 190 mètres en trois jours, le rover Opportunity arrive à proximité du cratère double baptisé « San Antonio » d'environ 40 mètres de diamètre au Sol 2194 (27 mars), ou le robot s'arrête durant les cinq jours suivants pour étudier plus en détail les environs. Opportunity reprend la route sur le Sol 2199 et parcourt une distance de 268,25 mètres en 21

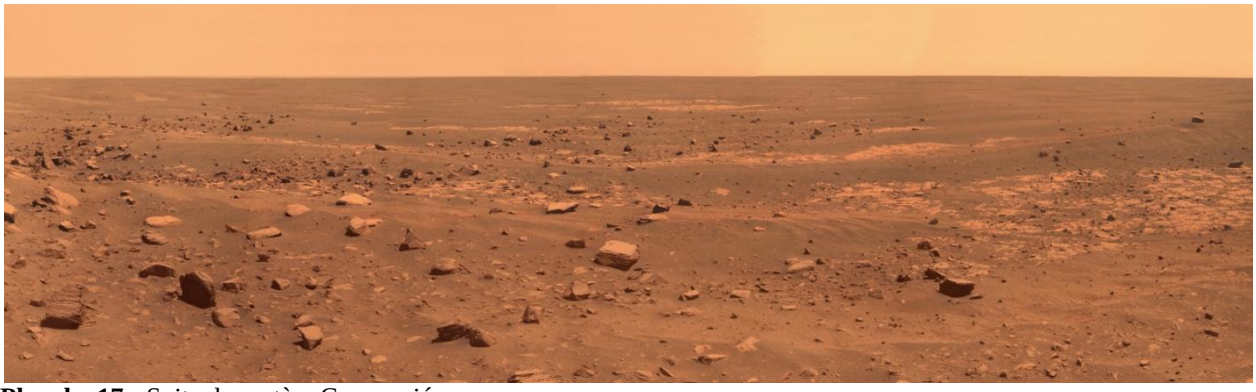


Planche 17 : Suite du cratère Concepción

Figure 85 : Sol 2220 et 2221 (Crédit : NASA/JPL-Caltech)

Sols avant de s'arrêter de nouveau à environ six kilomètres au sud-ouest du cratère « Victoria », pour prendre un nouveau cliché panoramique des environs avec ses caméras de navigations entre les Sols 2220 et 2221 (Figure 85). Six jours plus tard sur le Sol 2226 (28 avril), l'astromobile photographie la crête nord-ouest du cratère « Endeavour » (Figure 83) qui se trouve alors à environ 13 kilomètres plus loin vers le sud-est. Le quatrième solstice d'hiver, qui est le plus froid rencontré jusqu'ici à la surface de la planète rouge, fait son entrée officielle deux semaines plus tard sur le Sol 2240 (13 mai), et le bilan d'énergie du rover n'est plus que de 232 watts/heure. Une petite rafale de vent est venue nettoyer les panneaux solaires de l'astromobile, et a enlevé un peu de poussière sur les lentilles des caméras panoramique (PANCAM) du robot Opportunity au Sol 2246, augmentant du même coût le pouvoir électrique de plus de 10 % passant de 232 watts/heure à plus de 275 watts/heure. Les images prises par le robot sont également un peu plus nette, et le travail de recomposition pour nettoyer les images est rendu moins difficile. Le lendemain, sur le Sol 2247 le 20 mai 2010, le rover bat le record de longévité de Viking 1 qui était de 6 ans et 116 jours (2 246 Sols).

L'équipe de Steve Squyres, qui est le responsable scientifique de la mission MER sur Mars, a décidé de conduire le robot vers l'Est à partir du Sol 2252 (le 26 mai), dans l'espoir de pouvoir mener des expériences sur des minéraux hydratés qui se trouvent sur un segment de la bordure nord-ouest du cratère « Endeavour » (« Cape York » et « Cape Tribulation »). Il s'agit de la découverte effectuée par l'orbiteur MRO en novembre 2009 (Figure 84), qui a photographié depuis son orbite des dépôts de minéraux hydratés sur le flanc ouest du cratère, et qui semble composé de phyllosilicate argileux (smectite) et de sulfate (James Wray et al. Geophysical Research 2009). Il s'agit de matériau plus vieux qui date de l'époque du Noachien ou du Phyllosien selon la chronologie utilisée, et qui a été exposé plus récemment par l'érosion du sol. Il existe plusieurs dépôts de phyllosilicates argileux sur la planète qui ont été découverts par les orbiteurs entre les années 2005 et 2008, comme « Syrtis Major », « Nili Fossae », « Valles Marineris », le cratère « Jeziro » (futur cible pour le rover Curiosity) et « Mawrth Vallis ». Ont

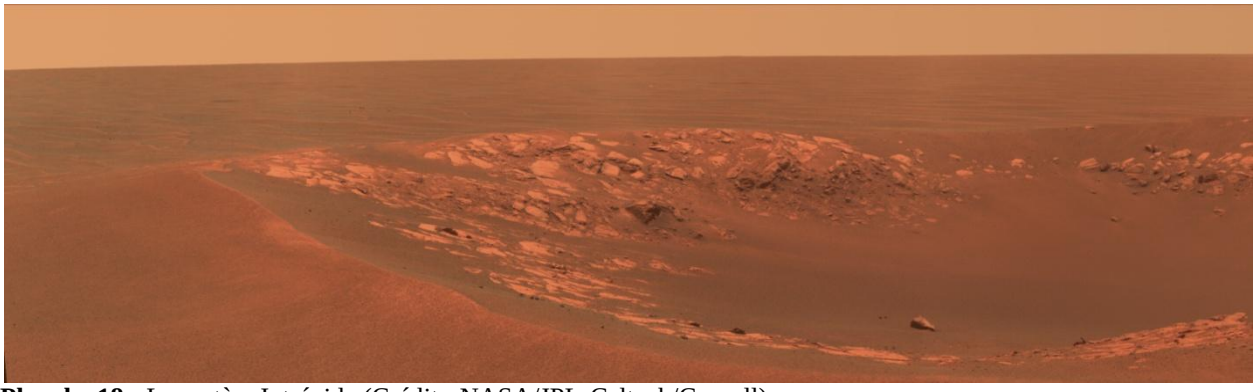


Planche 18 : Le cratère Intrépide (Crédit : NASA/JPL-Caltech/Cornell)

les retrouvent surtout dans les régions qui ont subi de grands bouleversements géologiques, comme les régions de grande inondation ou de coulée de lave, qui ont érodé la surface de la planète en exposant les couches argileuses plus vieilles qui étaient enfouies plus profondément.

Sur le Sol 2272 le 15 juin 2010, le rover Opportunity franchit le cap de son vingt et unième kilomètre parcouru à la surface de la planète Mars. Une nouvelle petite rafale de vent est venue nettoyer les panneaux solaires du rover au Sol 2298 (11 juillet), et le facteur d'accumulation de poussière sur les panneaux solaire est passé de 0,577 à 0,7. Ce qui a fait grimper le bilan d'énergie de plus de 30 %, passant de 359 watts/heure à plus de 492 watts/heure sur le Sol 2300. Trois jours plus tard sur le Sol 2301, l'astromobile réussi pour la première fois à photographier son premier tourbillon de poussière sur Mars, qui sont aussi appelé Dust Devil. Les tornades de poussières sont plus rares dans la région de « Meridiani Planum » explorée par le robot Opportunity, dont la surface est recouverte de petites billes d'hématite, que dans les régions plus poussiéreuses explorées par le rover Spirit dans le cratère « Gusev ». Sur son parcours, Opportunity longe plusieurs petits cratères d'impacts de quelques mètres de diamètre, et franchit le cap de son vingt-deuxième kilomètre sur le Sol 2322 (le 5 août). Entre les Sols 2336 et 2346, l'astromobile fait une pause pour effectuer une campagne d'analyse de douze jours sur des cibles qui se trouvent sur des pavés d'affleurements rocheux. Le rover reprend sa route vers l'ouest et franchit le cap de son vingt-troisième kilomètre sur le Sol 2355 (8 septembre), incluant deux séances de roulement quotidien qui ont été supérieur au cent mètres, soit le Sol 2353 avec 110,3 mètres et le Sol 2355 avec 102,7 mètres.

Figure 86 : Sol 2363 (Crédit : NASA/JPL-Caltech)

L'astromobile Opportunity qui progresse depuis quelque temps sur un terrain plus ferme, recouvert de pavé d'affleurement rocheux surmonté par endroits de quelques petites ondulations de dunes plus sombres. Ce qui permet au robot de planifier plus facilement et plus régulièrement des séances de conduite quotidienne supérieure au cent mètres, comme au Sol 2358 avec une distance parcourus de 105,4 mètres. Cependant Opportunity s'arrête entre les Sols 2363 et 2365,

Planche 18 : Suite du cratère Intrépide.

Figure 87 : Sol 2393 (Crédit : NASA/JPL-Caltech)

le temps de prendre un nouveau cliché panoramique des environs avec ses caméras de navigation (Figure 86). Le rover reprend de nouveau la route pour s'approcher d'une nouvelle météorite composée de fer-nickel qu'il a aperçue de loin et qui a été baptisée « Oileán Ruaidh » (Figure 80), dans le but d'effectuer son étude entre les Sols 2367 et 2374 du 20 au 28 septembre. Il s'agit de la cinquième météorite qui a été rencontrée à la surface de la planète depuis le début de la mission d'Opportunity sur Mars. Dix jours plus tard, le rover franchit le cap de son vingt-quatrième kilomètre parcouru à la surface de la planète sur le Sol 2393 (17 octobre), et profite de l'occasion pour prendre un nouveau cliché panoramique de 360° de la région avec ses caméras de navigation (Figure 87). Dès le lendemain et durant les dix prochains jours, L'astromobile va effectués quatre séances de roulement quotidien qui seront supérieur au cent mètres. Il s'agit du Sol 2394 avec 100,5 mètres et du Sol 2395 avec 100,3 mètres, suivit six jours plus tard par le Sol 2401 avec au compteur 121,8 mètres et du Sol 2403 avec un parcours de 127 mètres.

Le rover poursuit sa randonnée sur Mars vers le sud-est en direction de l'énorme cratère « Endeavour », et rejoint trois semaines plus tard sur le Sol 2415 (9 novembre) le petit cratère d'impact « Intrepid » de 20 mètres de diamètres. Le cratère a été baptisé ainsi en l'honneur du module lunaire de la mission Apollo 12, qui a atterri sur la Lune le 19 novembre 1969. Durant les cinq jours suivants, Opportunity va faire une pause pour étudier les contours du cratère qui est de la même taille que le cratère « Eagle », et le robot va également profiter de cette occasion pour prendre une magnifique image couleur des environs avec ses caméras panoramiques PANCAM entre les Sols 2417 et 2420 (Planche 18). Sur l'image de droite de la planche 18, on peut voir au loin sur la ligne d'horizon la crête ouest du cratère « Endeavour », qui se trouve encore à plus de sept kilomètres et demi vers l'est. Le jour de son départ du cratère « Intrepid » sur le Sol 2420 (14 novembre), le rover a parcouru une distance de 107,7 mètres franchissant du même coup le cap de son vingt-cinquième kilomètre parcouru à la surface de Mars. Soit une distance qui est 40 fois plus grande que les 600 mètres qui avaient été initialement prévus pour toute la durée de la mission du robot sur la planète rouge. L'exploit sera de nouveau répété au Sol 2424 avec une

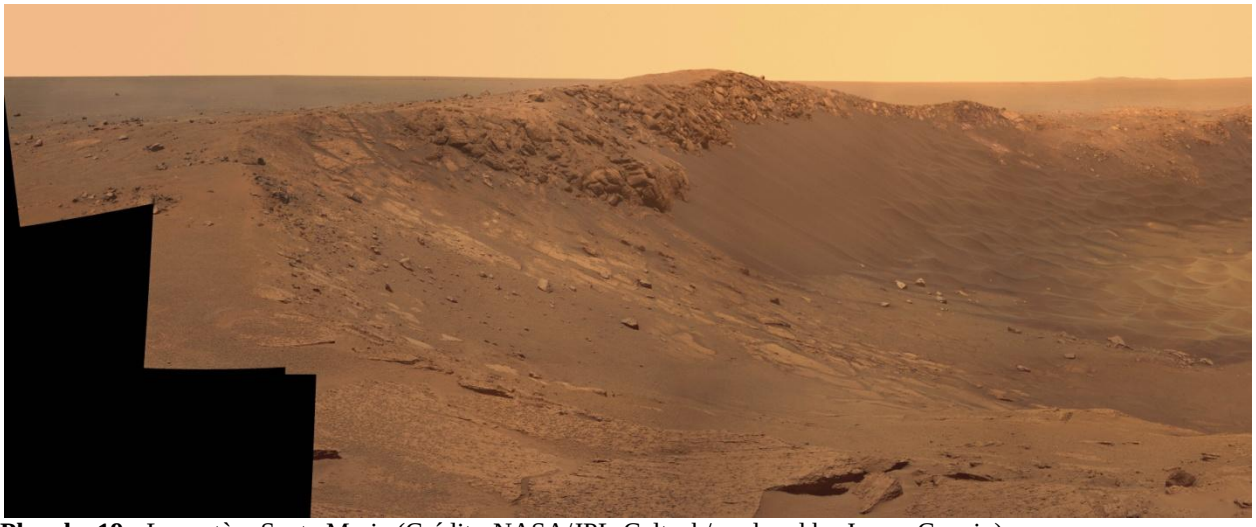


Planche 19 : Le cratère Santa Maria (Crédit : NASA/JPL-Caltech/rendered by James Canvin)

distance parcourus de 129,4 mètres, puis de nouveaux aux Sols 2436, 2438, 2441, 2442, 2444 et 2447, avec respectivement : 100,5, 102,4, 139,3, 124,1, 100,3 et 141,7 mètres. Durant le trajet le vingt sixième kilomètre est franchit au Sol 2443 le 13 décembre 2010. Opportunity se déplace maintenant en direction du cratère « Santa Maria », qui a la même grosseur que le cratère « Endurance » avec ses 90 mètres de diamètre sur plus de dix mètres de profondeur. Le cratère « Santa Maria » se trouve encore à environ 1,5 kilomètre vers l'Est, et la présence de minéraux hydrater a été détecté par le spectromètre CRISM embarqué sur l'orbiteur MRO.

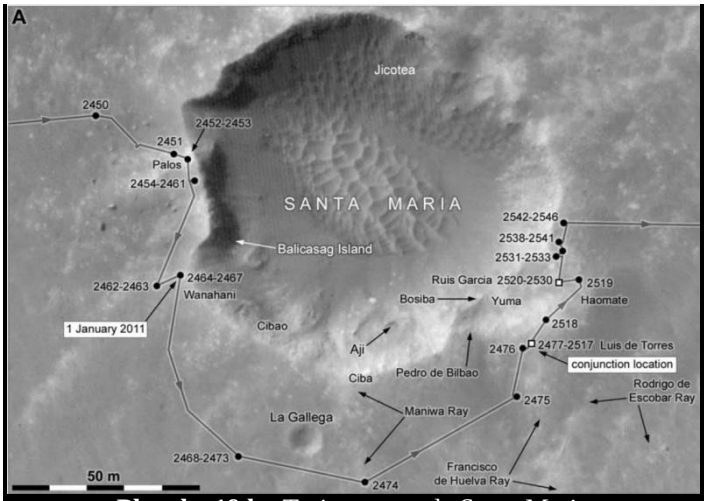


Planche 19 b : Trajet autour de Santa Maria
(Credit: The International Atlas of Mars Exploration: Volume 2, Philip J. Stooke, Cambridge University Press 2014, page 183)

Opportunity arrive enfin sur le bord ouest du cratère « Santa Maria » au Sol 2451 le 16 décembre 2010, et il ne reste plus que 6,5 kilomètres à parcourir avant d'atteindre la prochaine cible d'intérêt géologique : le « Cape York » qui est située sur le flanc nord-ouest du grand cratère d'impact « Endeavour ». L'astromobile profite de l'occasion pour faire une longue pause de plus de 95 Sols à proximité du cratère « Santa Maria » (Planche 19:b), dans le but de se préparer à passer la quatrième conjonction solaire qui approche et pour mener à bien une étude plus approfondie des environs. Opportunity aura l'occasion d'utiliser de nouveau ses instruments situés à l'extrémité de son bras robotisé pour étudier et analyser les roches sur le sol, et pour faire l'étude à distance des couches sédimentaires qui tapissent les flancs de la face intérieure du cratère. Le jour suivant, le rover se déplace encore de quelques mètres pour venir s'immobiliser à seulement cinq mètres du bord de la crête nord-ouest du cratère. Le robot entame aussitôt le magnifique cliché panoramique en couleur de 120° entre les Sols 2453 et 2454, qui dévoilent la beauté du paysage des environs avec en prime des dunes de sables ondulantes qui tapissent le fond du cratère (Planche 19). À partir du Sol 2454 (le 19 décembre

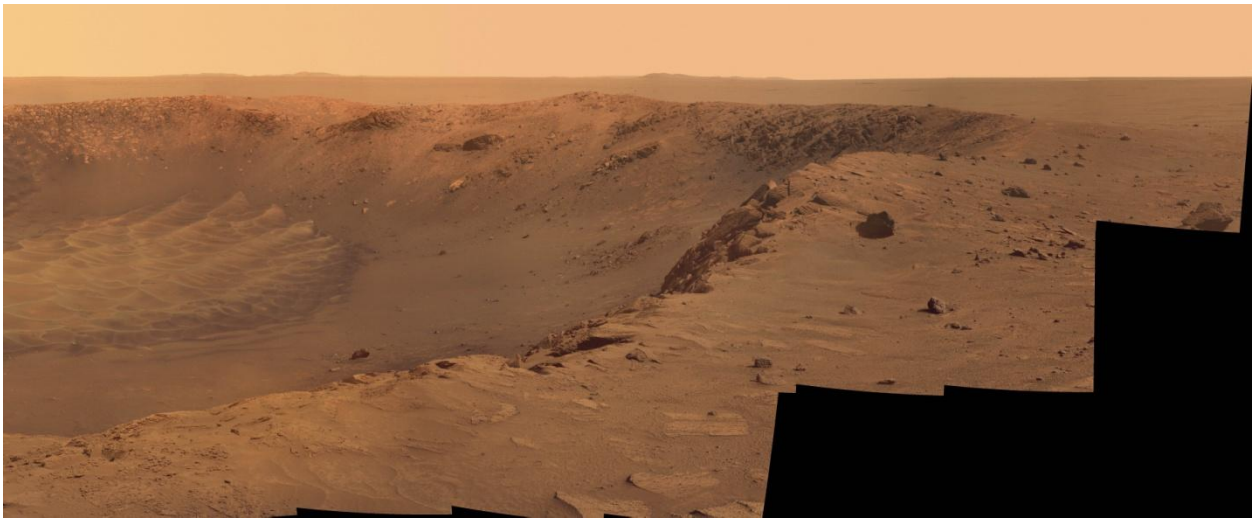


Planche 19 : Le cratère Santa Maria (Crédit : NASA/JPL-Caltech/rendered by James Canvin)

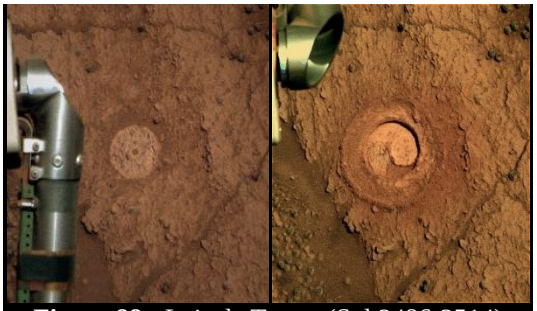


Figure 88 : Luis de Torres (Sol 2486-2514) (Crédit : NASA/JPL-Caltech/Stuart Atkinson)

2010), Opportunity contourne le cratère par le sud-ouest dans le sens contraire des aiguilles d'une montre, dans le but de se diriger avant le début de la conjonction solaire vers une portion de terrain dénommé « Yuma ». Il s'agit d'une petite dépression circulaire située sur le bord sud-est de l'autre côté du cratère, à l'endroit même ou le spectromètre CRISM (Compact Reconnaissance Imaging Spectrometer pour Mars) de l'orbiteur MRO a détecté en 2009 la présence de sulfate hydraté. Il pourrait s'agir de Kieserite ($MgSO_4 + H_2O$) qui est un sulfate de magnésium hydraté, et que l'on retrouve dans les dépôts de type évaporite. Opportunity aura parcouru une distance annuelle de 7 578.08 kilomètres en 2010, en plus de détenir quinze séquences de roulement quotidien supérieur au 100 mètres. Après un arrêt de six Sols près de la petite dépression de forme circulaire dénommée « La Gallega », qui se trouve dans la région sud du cratère « Santa Maria ». Le rover s'est remis à conduire sur le Sol 2474 en se dirigeant vers le nord-est, afin de rejoindre l'endroit où le robot doit passer la quatrième conjonction solaire près d'une cible de surface brillante baptisée « Luis de Torres », que l'astromobile atteindra trois jours plus tard sur le Sol 2477 le 11 janvier 2011. L'astromobile immortalise ensuite le site de la quatrième conjonction solaire dès le lendemain au Sol 2478 en prenant le magnifique panorama de la figure 88:b avec ses caméras NavCam.

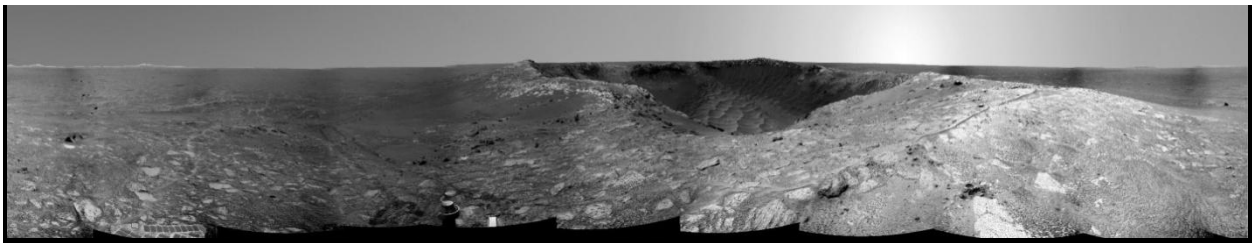


Figure 88 b : Sol 2478 (Crédit : NASA/JPL-Caltech/Jan van Driel)

Durant les Sols suivants, Opportunity se prépare à conduire une vaste campagne d'étude et d'analyse sur le pavé d'affleurement « Luis de Torres », que le robot devra effectuer en mode

Figure 89 : Au sud de Santa Maria Sols 2512-17 (Crédit : NASA/JPL-Caltech/rendered by James Canvin)

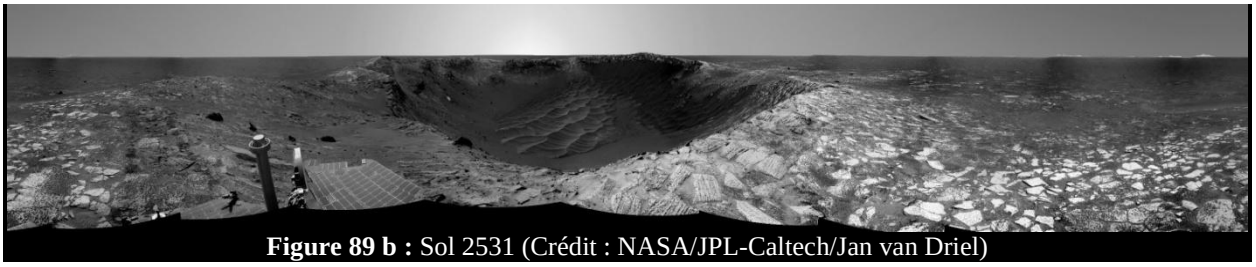


Figure 89 b : Sol 2531 (Crédit : NASA/JPL-Caltech/Jan van Driel)

automatique durant la quatrième conjonction solaire prévu entre les Sols 2493 et 2508 (du 28 janvier au 12 février 2011). Le rover utilise son outil d'abrasion RAT sur le Sol 2484, pour enlever un peu de poussière qui se trouve à la surface de sa cible (Figure 88 à gauche). Puis deux jours plus tard sur le Sol 2486, le robot place son spectromètre Mössbauer pour se préparer à faire une longue séance d'intégration de plusieurs semaines. Opportunity fête sa septième année à explorer la surface de la planète Mars sur le Sol 2489 le 24 janvier 2011, soit tout juste deux jours avant le début de la quatrième conjonction solaire. Après la quatrième conjonction solaire, Opportunity entame le panorama couleur de 360° effectué à partir de la région sud du cratère « Santa Maria » entre les Sols 2512 et 2517 (Figure 89). Et le lendemain sur le Sol 2513, le rover creuse plus profondément dans la cible qui se trouve sur « Luis de Torres » (Figure 88 à droite), afin d'avoir un échantillon bien propre de 3 mm de profondeur pour effectuer une mesure avec le spectromètre à rayon X et alpha (APXS) sur les Sols suivants.

Figure 90 : Sol 2544, l'horizon sud-est de Santa Maria (Crédit : NASA/JPL-Caltech)

L'astromobile repend ensuite la route au Sol 2518 en longeant la crête nord-est du cratère, dans le but de s'approcher de la roche baptisée « Ruiz Garcia » que le rover atteindra deux jours plus tard, et qu'il va par la suite étudier jusqu'au Sol 2531 (8 mars) (Figure 89:b). Après avoir effectué différentes prises de vues stéréoscopiques à partir du flanc sud-est du cratère « Santa Maria », dont un cliché de 252° pris avec ses caméras de navigation au Sol 2544 (Figure 90). Le rover Opportunity reprend de nouveau la conduite vers l'Est en direction du grand cratère

« Endeavour » au Sol 2547 (le 24 mars). Et de nouveaux, l'astromobile aura l'occasion d'effectué plusieurs autres séances de conduites quotidienne supérieure au cent mètres, et ceci, durant tout le trajet le conduisant vers « Cape York ». Le cap du vingt-septième kilomètre parcouru à la surface de la planète Mars est franchi sur le Sol 2552, et huit jours plus tard le rover fait la rencontre d'une cible sur le sol dénommé « Santa Barbara » qu'il étudie brièvement au Sol 2560. L'astromobile qui fonce maintenant à toute allure vers le cratère « Endeavour », parcourt en moyenne une centaine de mètres par jours (Sols 2554, 2556, 2560, 2562, 2569, 2572, 2576). Le solstice d'été arrive deux jours plus tard sur le Sol 2562 (9 avril), et dix jours plus tard Opportunity franchi le cap de son vingt-huitième kilomètre parcourus à la surface de la planète au Sol 2572. Et au Sol 2579 (26 avril), le robot établi un nouveau record de conduite en marche arrière en parcourant une distance de 150,8 mètres.

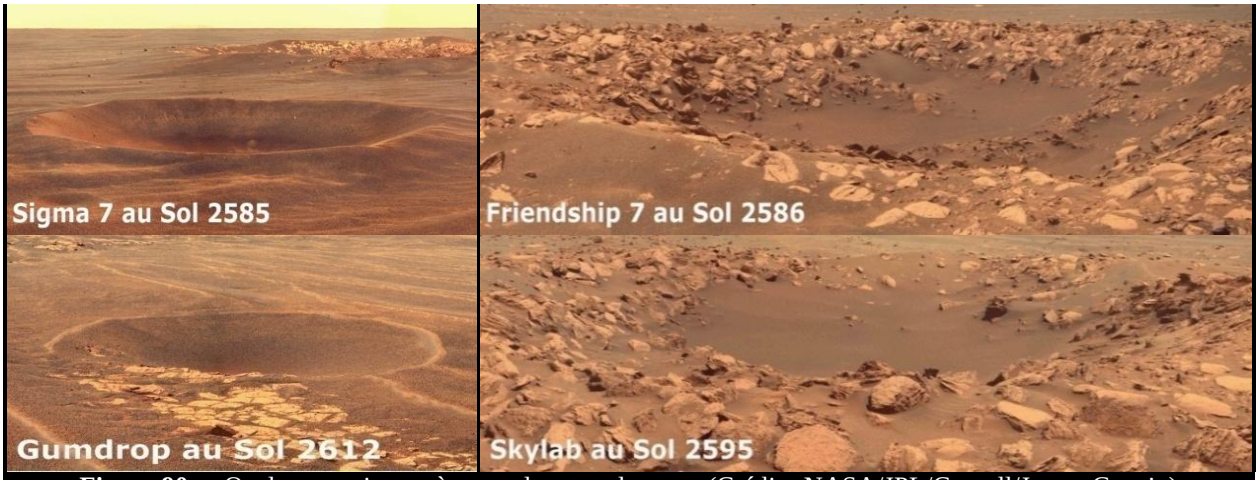


Figure 90a : Quelques petits cratères sur la route du rover (Crédit : NASA/JPL/Cornell/James Canvin)

L'astromobile qui conduit un jour sur deux, le temps de lui permettre de recharger ses batteries, s'arrête à l'occasion pour faire de courte étude des cratères qu'il rencontre sur sa route. Le rover croise sur son chemin un petit groupement de quatre cratères entre les Sols 2583 et 2587, dénommés « Sigma 7 », « Faith 7 », « Friendship 7 » et « Freedom 7 » qui est le plus grand d'entre eux avec un diamètre de 30 mètres (Figure 90:a). Le cap du vingt-neuvième kilomètre est franchi au Sol 2592 le 10 mai, et deux jours plus tard le rover passe à la hauteur du petit cratère« Skylab » d'une dizaine de mètres de diamètres. L'astromobile s'arrête une semaine entière devant la cible de sol baptisée « Valdivia » pour l'étudier entre les Sols 2606 et 2613. Le rover reprend la route le jour suivant et franchit le cap de son trentième kilomètre parcouru à la surface de Mars (2 juin). Deux jours plus tard sur le Sol 2616 (le 3 juin), Opportunity accomplit un nouveau record de conduite en marche arrière en parcourant une distance de 165,67 mètres. Après avoir contourné le cratère « Gemini 5 » d'environ 25 mètres de diamètre au Sol 2621, et d'un autre petit champ de cratère baptisé « Crater Cluster » au Sol 2627, le rover franchit le cap de son trente et unième kilomètre sur le Sol 2630 (le 18 juin). Le cap du trente-deuxième kilomètre est franchi en seulement vingt-quatre jours sur le Sol 2654 (12 juillet) avec régulièrement des parcourt de plus d'une centaine de mètres par jours (voir en Annexe : Séance de Roulement Quotidien de 100 Mètres et Plus). Une semaine plus tard au Sol 2661, le rover passe au sud du cratère « Mariner 9 » d'une quarantaine de mètres de diamètre. Sur le Sol 2670 le 29 juillet, juste avant d'arriver à la hauteur de « Pathfinder Mount », l'astromobile franchit le cap de son trente-troisième kilomètre parcouru à la surface de la planète Mars, et cinq jours plus tard

au Sol 2675 le rebot fête son quatrième anniversaire martien. Opportunity va parcourir les derniers 440 mètres en dix jours entre les Sols 2671 et 2681, avant d'atteindre finalement sa nouvelle cible d'intérêt géologique.

Figure 90 B : Séance de travail à Penrhyn, Island Islengton et Peck Bay2.
(Crédit : NASA/JPL-Caltech/Cornell)

Après avoir parcourus 6 518,38 mètres depuis son départ du cratère « Santa Maria » au Sol 2557, et plus de 21,5 kilomètres en 2 ans 9 mois et 2 jours (998 Sols) depuis la sortie du cratère « Victoria ». Opportunity rejoint finalement la bordure du flanc nord-ouest du cratère « Endeavour » à l'endroit baptisé « Spirit point », et s'arrête sur la croûte du Noachian qui se trouve tout juste au pied du flanc sud-ouest de « Cape York » au Sol 2681 le 9 août 2011.

Minéreaux Argileux : Phyllosilicate : Groupe des Smectites (phyllosilicates d'aluminium hydratés) : (feuillets gonflants) : (structure à trois couches)	
Saponite	$Ca_{0.25}(Mg,Fe)_3((Si,Al)_4O_{10})(OH)_2 \cdot n(H_2O)$
Nontronite	$Na_{0,3}Fe^{III}{}_2(Si,Al)_4O_{10}(OH)_2 \cdot n\ H_2O$
Montmorillonite	$(Na,Ca)_{0.33}(Al,Mg)_2(Si_4O_{10})(OH)_2 \cdot nH_2O$
En rouge : Structure centrale occupé par un tétraèdre de silice SiO_4	

CAPE YORK
(Sol 2681 à 3316)

Le rover Opportunity qui vient de traverser la limite des plaines de « Meridiani Planum », se trouve maintenant stationné à la base sud-ouest de « Cape York » au site dénommé « Spirit point » (Planche 20). Il s'agit d'une petite colline de forme allongée d'environ 20 mètres de haut sur près de 800 mètres de long ayant une largeur moyenne de 180 mètres avec des pentes de plus de 25° par endroits, qui borde la crête du flanc nord-ouest du cratère « Endeavour ». L'astromobile entame aussitôt un cliché panoramique des lieux avec ses caméras de navigation (Figure 91), qui dévoile toute la beauté du paysage martien qui se trouve sur la bordure du segment nord-ouest du cratère « Endeavour ». La partie gauche du cliché correspond à la vue avant du rover, qui progresse sur le terrain en faisant marche arrière afin d'économiser l'usure prématurée de sa roue avant droite, tandis que la partie droite du cliché correspond à la vue arrière. On peut voir sur le cliché en partant de la gauche vers la droite : le cratère « Odyssey » de 20 mètres de diamètre situé à une trentaine de mètres à l'Est du rover (Figure 90:b), une partie du planché du cratère « Endeavour » avec au loin les collines qui délimite ses contours, et vers le centre de l'image on peut voir « Cape Tribulation » qui surplombe « Botany Bay ».

Figure 91 : Spirit point, caméra de navigation au Sol 2681 (Crédit : NASA/JPL-Caltech)

Figure 91 b : Près du cratère Odyssey, Sol 2692-93 et 2695 (Crédit : NASA/JPL-Caltech/Jan van Driel)

Contre toute attente, le rover Opportunity a réussi à rejoindre la bordure nord-ouest du vaste cratère « Endeavour » à l'un des endroits ou l'orbiteur MRO a détecté en 2009[19] la présence d'indice minéralogique d'un environnement passé plus humide datant du Noachian. Il s'agit de minéraux hydratés qui font partie de la famille des sulfates et des phyllosilicates, comme la

[19] Géophysical Research Letters du 4 novembre 2009

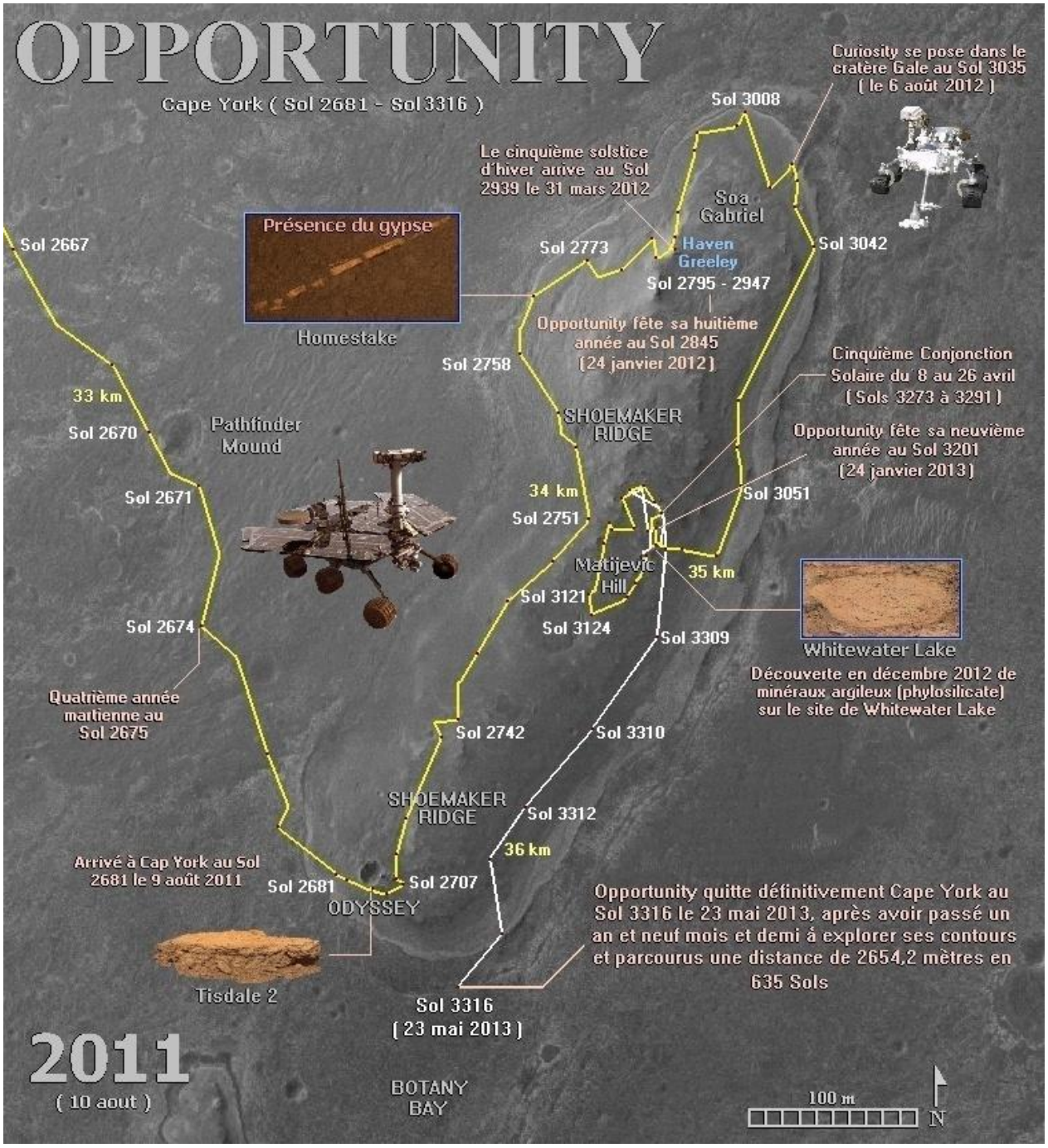


Planche 20 : Le parcours d'Opportunity entre les Sols 2681 et 3316. La photo d'arrière-plan a été obtenue grâce aux données fournies par la caméra CTX de Mars Reconnaissance Orbiteur (MRO) en 2011. Position et trajet des rovers guidées par les cartes de la NASA et de Eduardo Tesheiner.

smectite qui est une argile phyllosilicaté qui résulterait du lessivage des basaltes par de l'eau neutre sur une longue période de temps. La smectite se trouve à environ 200 mètres plus au nord sur le côté intérieur de « Cape York ». L'astromobile entame l'étude du cratère « Odyssey » qu'il contourne tranquillement par le sud-ouest dans le sens contraire des aiguilles d'une montre, entre les Sols 2690 et 2737 du 18 août au 7 octobre (Figure 91:b). Le rover s'arrête ensuite au sud du cratère « Odyssey » près d'un grand bloc d'éjecta dénommé « Tisdale 2 » d'un mètre de long sur

Figure 92 : Tisdale 2
(Credit : NASA/JPL-Caltech/Cornell/Stuart Atkinson)

30 cm de haut (Figure 92). Il s'agit d'un affleurement riche en zinc et en brome qui fait partie des roches sédimentaires de type breccia, formé de fragments rocheux basaltiques qui ont été cimentés ensemble par une matrice de grain fin. L'étude de « Tisdale 2 » va commencer sur la cible « Timmins » entre les Sols 2694 et 2698, « Shaw 1 » entre les Sols 2699 et 2700, puis « Shaw 2 » sur le Sol 2701. Après avoir effectué le dernier test pour essayer de récupérer le spectromètre infrarouge Mini-TES au Sol 2700, qui ne donne plus signe de vie depuis la fin de la tempête globale de 2007 (Sol 1273), ce dernier est officiellement déclaré hors d'usage. Opportunity se déplace ensuite de 47 mètres plus hauts vers le nord-est, pour aller étudier plusieurs cibles de sol qui se trouve sur l'affleurement rocheux « Chester Lakes » d'environ un mètre de long entre les Sols 2707-2734 (Figure 93). Une semaine plus tard sur le Sol 2715 le 14 septembre 2011, le robot assiste à l'arrivé de l'équinoxe d'automne dans l'hémisphère sud de la planète. L'astromobile va utiliser de nouveau son outil d'abrasion RAT à plusieurs reprises, pour brosser et creuser plus profondément la cible « Salisbury 1» (Sol 2217, 2726 et 2729) qui se trouve sur l'affleurement rocheux « Chester Lakes ».

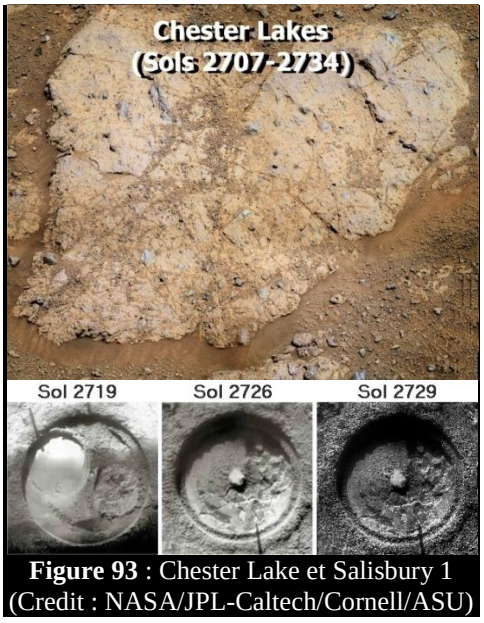


Figure 93 : Chester Lake et Salisbury 1
(Credit : NASA/JPL-Caltech/Cornell/ASU)

Avec un facteur Tau et une accumulation de poussières sur les panneaux solaires qui sont plus haut que par les années passées, sans compter le raccourcissement de la durée d'ensoleillement à l'approche du solstice d'hiver qui aura lieu le 31 mars 2012. Il est à prévoir que la production quotidiennement d'énergie sera très fortement réduite, et que le rover devra rester immobile une bonne partie de l'hiver martien pour rester opérationnelle. Il est maintenant temps pour Opportunity de partir en reconnaissance du terrain, et de reprendre la route vers le nord au Sol 2737 en longeant sur une centaine de mètres le flanc ouest de la crête « Shoemaker Ridge », qui se trouve au sommet dans la partie sud de « Cape York ». L'astromobile doit trouver un refuge qui présente une bonne inclinaison vers le nord en direction du soleil, et qui serait le plus favorable possible à la production d'énergie, et ceci, afin de donner une chance au robot de passer à travers son cinquième hiver martien qui s'annonce déjà très rude. Neuf jours plus tard sur le Sol 2754, Opportunity franchit le cap de son trente-quatrième kilomètre parcouru à la surface de la planète Mars (23 octobre). L'astromobile arrive aux pieds de la crête « Saddleback », qui se trouve dans la partie nord de « Cape York », et que le rover contourne par le nord-ouest afin de rejoindre son site d'hivernage situé sur le versant nord de « Cape York ».

Sur le Sol 2763, le rover rencontre pour la première fois une veine de matière blanche tonifiée qui émerge de la surface martienne. Il s'agit de l'affleurement baptisé « Homestake » de 40 centimètres de long sur 2 centimètres de large (Figure 94), que l'astromobile va étudier durant huit jours jusqu'au Sol 2771 le 9 novembre. Les analyses effectuées par le spectromètre APXS, qui a été annoncé un mois plus tard le 7 décembre 2011 lors de la conférence de presse de

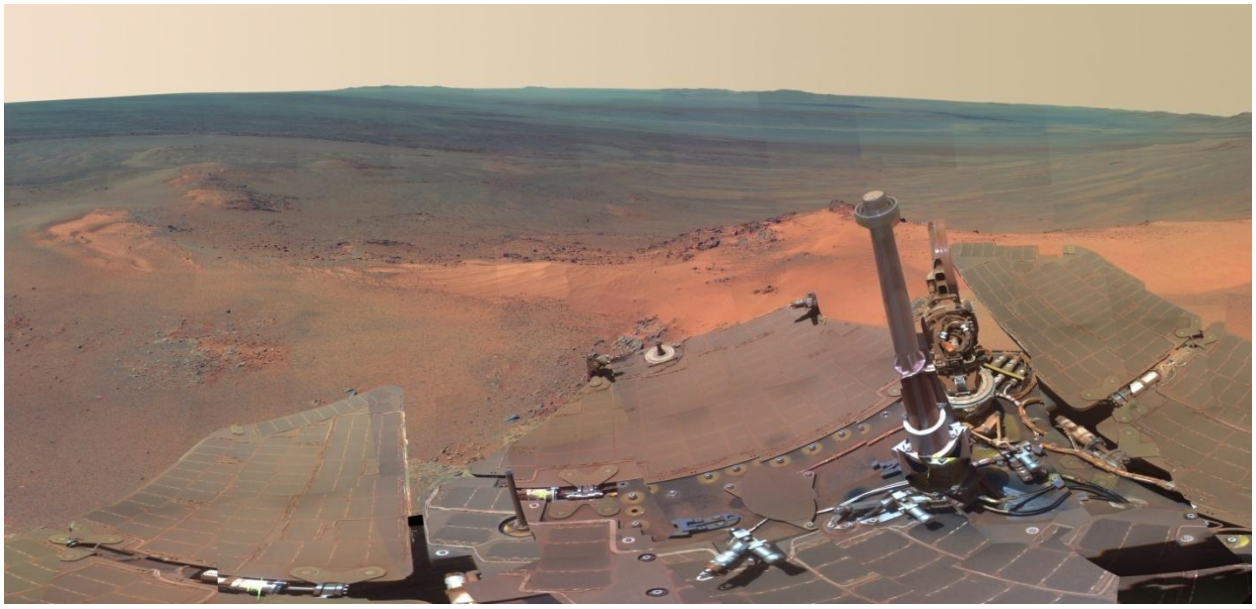


Planche 21 : Cinquième site d'hivernage Greeley Haven (Crédit : NASA/JPL-Caltech/Cornell/Arizona State Univ)

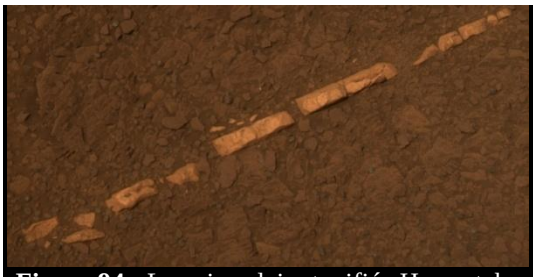


Figure 94 : La veine claire tonifiée Homestake (Crédit : NASA/JPL-Caltech/Cornell)

l'American Geophysical Union (AGU). Ont fait ressortir la présence du gypse ($CaSO_4*2H_2O$) dans la composition de l'affleurement « Homestake ». Il s'agit d'un minéral sédimentaire composé de sulfate de magnésium hydraté qui se forme uniquement en présence d'eau neutre, soit à partir d'une source d'eau froide souterraine ou d'une source chaude dans le cas d'une source hydrothermalisme. Ces résultats semblent vouloir indiquer que son origine remonte à plusieurs milliards d'années, et que les couches sédimentaires plus profondes auraient surgi à la surface suite à la collision qui aurait creusé le cratère « Endeavour », âgée de deux ou trois milliard d'années. Opportunity se remet ensuite en route vers le nord-est au Sol 2773, et rejoint dix jours plus tard une cible de sol baptisée « Transvaal » (Figure 94:b), que le rover va étudier durant la semaine suivante jusqu'au Sol 2790 (29 novembre). La composition de l'affleurement « Transvaal » s'est révélée être semblable à celle de « Chester Lakes » et de « Tisdale 2 ».

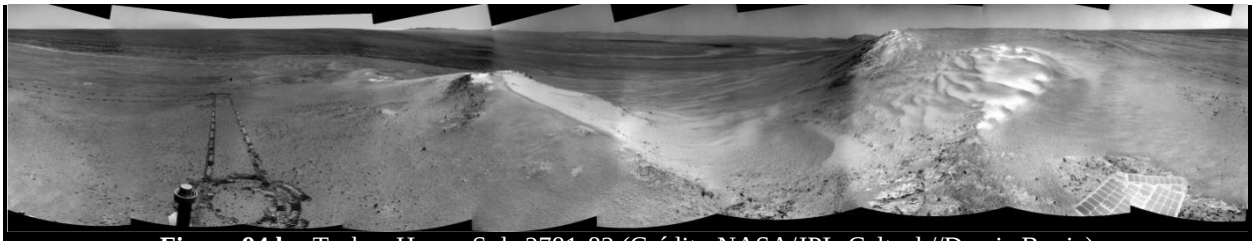


Figure 94 b : Turkey Haven Sols 2781-82 (Crédit : NASA/JPL-Caltech//Damia Bouic)

L'astromobile reprend ensuite la route vers le nord-est et parcourt une courte distance de douze mètres avant de rejoindre finalement son cinquième site d'hivernage, qui est situé vers l'extrémité nord de « Cape York ». Le site a été baptisé « Greeley Haven » (Planche 21) en hommage de l'un des membres de l'équipe, le planétologue Ron Greeley (1939-2011) qui est décédé de façon inattendue en octobre 2011. L'inclinaison du rover vers le nord en direction du

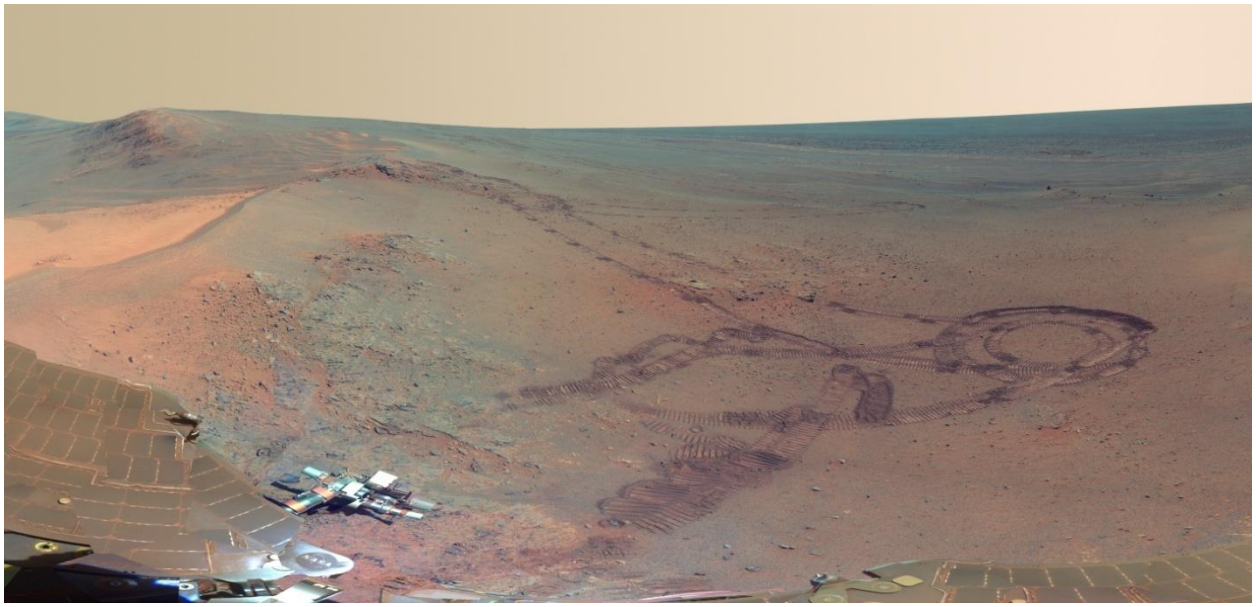


Planche 21 : Suite du cinquième site d'hivernage Greeley Winter Haven (Sols 2795-2946)

Figure 94 c : Sols 2790-91 (Crédit : NASA/JPL-Caltech//Damia Bouic)

soleil est de 15°, et le robot demeurera presque immobile durant le passage du solstice d'hiver martien (151 sols) ne faisant que quelques petits déplacements pour se positionner devant des cibles d'intérêts géologiques qui se trouvent à proximité. L'astromobile entame l'étude de plusieurs cibles qui se trouvent sur l'affleurement rocheux « Saddleback » entre les Sols 2795 et 2808, du 4 au 17 décembre 2011. À partir du Sol 2819 (29 décembre 2011), Opportunity amorce une vaste campagne d'étude de plusieurs semaines de la cible « Amboy », qui se trouve sur le pavé d'affleurement « Saddleback », et qui se poursuivra jusqu'au Sol 2947 (128 Sols). En 2011, Opportunity aura parcouru une distance annuelle record de 7,855.73 kilomètres à la surface de la planète Mars, incluant le record du nombre de séance de roulement quotidien de 100 mètres et plus (34), suivit au second rang par 2010 avec 16, de 13 pour 2005 et de 10 pour 2008. Les temps d'intégrations du spectromètre Mössbauer, qui n'est plus vraiment utilisable, prend désormais des semaines pour faire une bonne lecture, comparativement à quelque heure au début de la mission. Et ceci, à cause de l'épuisement des ses sources radioactives de cobalt 57 qui sont rendus à leurs douzième ou treizième cycles de demi-vie. Les scientifiques de la NASA vont profiter de cette immobilité de longue durée, pour mener à bien une expérience in situ sur le suivi du signal radio à partir du Sol 2822 (le 1er janvier 2012). L'objectif de cette expérience est de mesurer l'inertie de la planète (précession et nutation) par de fines oscillations géodynamiques de l'axe de rotation de la planète, par l'analyse de l'effet Doppler du signal radio transmis par l'antenne à hauts débits (HGA, où bande X) du rover. Les données recueillies donneront des renseignements sur la distribution des masses, de la taille et de la densité du noyau de la planète Mars, pouvant ainsi trahir la présence d'un noyau externe liquide ou solide.

Figure 95 : Sol 2965 (Crédit : NASA/JPL-Caltech)

L'astromobile entame à partir du Sol 2811 le 21 décembre 2011, le vaste panorama couleur de 360° baptisé « Greeley Haven » composé d'une mosaïque de 817 images prises à l'aide des treize filtres couleurs du rover (Planche 21). Opportunity fête sa huitième année à explorer la surface martienne sur le Sol 2845 le 24 janvier 2012. Et trois semaines plus tard le 15 février, la planète Mars passe à l'aphélie de son orbite à plus de 249,2 millions de kilomètres du soleil. Le solstice d'hiver arrive six semaines plus tard le 30 mars 2012 au Sol 2939, nous somme au début du centième mois d'exploration du rover sur la planète Mars. Durant tout le mois de mars, plusieurs petites rafales de vent ont nettoyé quelque peu la poussière qui s'était déposée sur les panneaux solaires du rover depuis des mois, tout en lui donnant un gain d'énergie de 8%. Après plus de quatre mois de presque immobilité (130 Sols) depuis le 26 décembre 2011, l'astromobile se remet enfin en route vers le nord sur le Sol 2947 (8 mai 2012). Soit tout juste après avoir livrées les dernières images du vaste panorama couleur de haute résolution « Greeley Haven », et après avoir effectués avec succès plus de 60 expériences de suivies du signal Radio-Doppler. Vers le centre du panorama « Greeley Haven » (Planche 21), nous pouvons voir le chiffre neuf dessiné sur le sol martiens par les roues du rover, voulant ainsi immortaliser l'exploit du passage vers la neuvième année d'exploration sur la planète Mars. Le Nord se trouve au centre du panorama, tandis que le Sud se trouve à chaque extrémité de l'image. On peut également voir le plancher intérieur du vaste cratère « Endeavor » qui se trouve dans la partie supérieure de l'image de droite, ainsi que le site baptisé « North Pole » de teinte plus claire situé au centre-gauche de la partie droite du panorama.

Figure 96 : Panorama (NAVCAM) de 360^0 pris entre les Sols 2989 et 2991 (Crédit : NASA/JPL-Caltech)

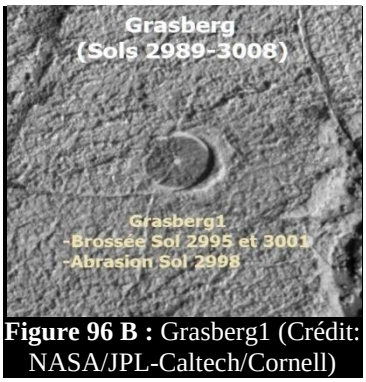


Figure 96 B : Grasberg1 (Crédit: NASA/JPL-Caltech/Cornell)

Le rover étudie la cible de poussière rouge qui recouvre le sol au site dénommée « North Pole » entre les Sols 2955 et 2963, puis c'est le tour de la veine tonifié de teinte blanchâtre « Monte Cristo » qui se trouve un peu plus loin entre les Sols 2971 et 2980 (Figure 95). Cette dernière se trouve sur le sol martien à l'extrémité nord de « Cape York ». Après avoir effectuée une intégration multi-Sols avec le spectromètre APXS, l'astromobile reprend sa route sur le Sol 2981 (12 juin), pour étudier la couche de transition qui se trouve entre la base de « Cape York » et le plancher de « Meridiani Planum » jusqu'au Sol 2989. Sur le Sol 2990 le 21 juin (Figure 96),

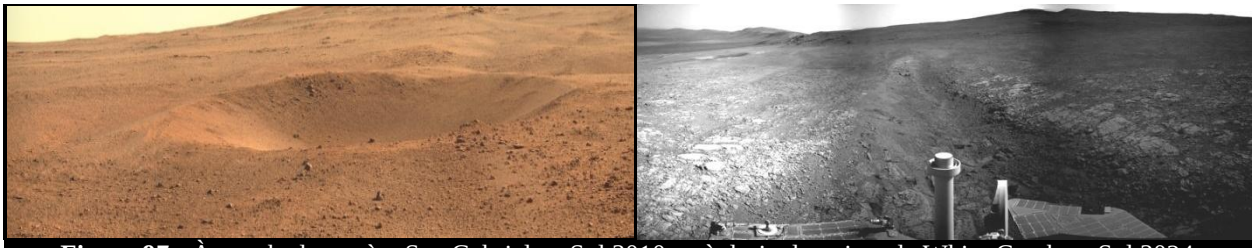


Figure 97 : À gauche le cratère Soa Gabriel au Sol 3010, et à droite la pointe de Whim Creak au Sol 3024 (Crédit : NASA/JPL/Cornell/James Canvin et NASA/JPL/Caltechl/M. Howard)

le rover entame l'étude d'une cible qui se trouve sur le pavé d'affleurement « Grasberg », que le robot brossera par la suite à plusieurs occasions entre les Sols 2995 et 3001 (Figure 96:B). Opportunity contourne ensuite le flanc nord-est de « Cape York » au Sol 3010, pour se diriger vers le Sud jusqu'à un petit ensemble de cibles de surface située sur le bord d'une petite fracture d'une centaine de mètres de longueur baptisée « Whim Creak », que le robot rejoint neuf jours plus tard sur le Sol 3019 après avoir photographié avec ses caméras panoramiques (PANCAM) le petit cratère « Sao Gabriel » (Figure 97). L'astromobile se déplace ensuite de l'autre côté de la petite fracture au Sol 3024, pour aller rejoindre la cible sur le sol baptisé « Rushall » que le rebot étudiera jusqu'au Sol 3039. Durant les neuf Sols suivant, soit entre les Sols 3024 et 3035 du 26 juillet au 6 août 2012. L'activité du rover sera limitée pour laisser disponible les relais de télécommunication de l'orbiteur Mars Odyssey 2001 de la NASA et des antennes du Deep Space Network (DSN), lors de l'approche finale et de l'atterrissage du rover américain Curiosity dans le cratère « Gale » programmé pour le 6 août 2012. Le site d'atterrissage de Curiosity est situé de l'autre côté de la planète Mars à plus de 8 400 km à l'Est de la zone d'exploration d'Opportunity.

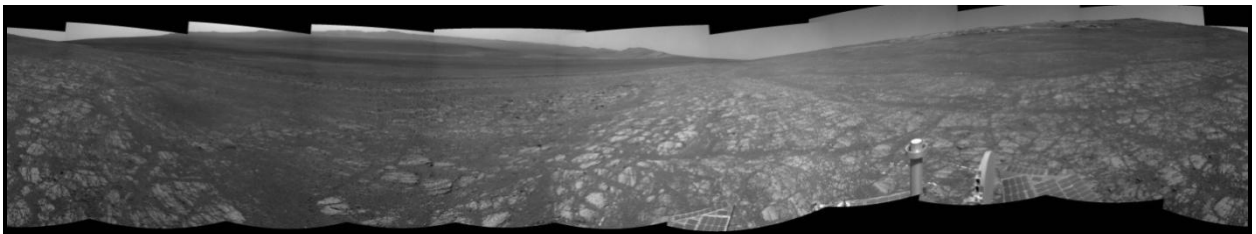


Figure 98 : En haut à droite : Matijevic Hill (Crédit : NASA/JPL-Caltech/Cornell Univ./Arizona State University)

Figure 99 : Whitewater Lake et Kirkwood (Crédit : NASA/JPL-Caltech/Cornell Univ./Arizona State University)

L'astromobile reprend la route vers le Sud au Sol 3040 le 12 août 2012 en longeant la bordure Est de la crête intérieure nord-ouest de « Cap York ». Le rover se dirige ensuite vers un affleurement rocheux de 30 centimètres de haut baptisé « Copper Cliff », à l'endroit ou l'imageur compacte du spectromètre infrarouge CRISM de l'orbiteur MRO a découvert des traces d'argiles et de phyllosilicates en 2008. Il s'agit d'un type spécifique de minéral argileux appelé smectite, qui s'est formé à l'origine dans les eaux souterraines légèrement acide qui remontait le long de fractures. Deux semaines plus tard sur le Sol 3054, l'astromobile prend un nouveau panorama des

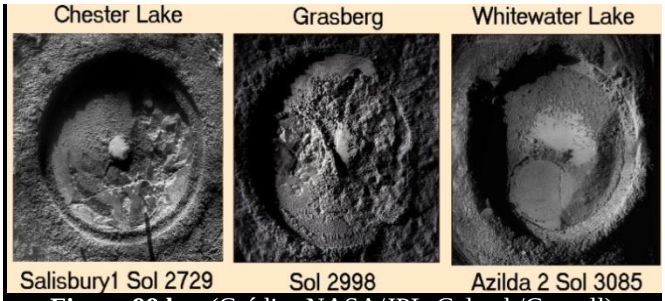


Figure 99 b : (Crédit : NASA/JPL-Caltech/Cornell)

lieux avec ses caméras de navigations (Figure 98). Opportunity change de direction et tourne vers la droite au Sol 3056 pour aller rejoindre un segment de la zone de travaille appelée « Matijevic Hill » dénommé « Kirkwood », que le robot rejoint au Sol 3060 et que l'on peut voir à droite du pavé d'affleurement de teinte claire « Whitewater Lake » sur la figure 99. L'astromobile franchit le même jour le cap de son trente-cinquième kilomètre parcouru à la surface de la planète Mars. Le rover va étudier l'affleurement « Kirkwood » d'aspect plus sombre durant les dix jours suivants entre les Sols 3060 et 3070, incluant une séance de brossage effectuée au Sol 3067 ou le robot va découvrire une nouvelle structure de myrtilles dénommé « New Berry ». Le robot se déplace ensuite vers l'affleurement « Whitewater Lake » au Sol 3070, puis amorce une séance d'étude d'une durée de presque trois semaines jusqu'au Sol 3090. Il s'agit du pavé d'affleurement de forme circulaire de teinte claire d'environ 0,8 mètre de diamètre qui se trouve tout juste au Nord de « Kirkwood », que l'on peut apercevoir vers le centre de la figure 99 et dans le haut de la figure 103. Par la suite, l'astromobile brossera à plusieurs reprises l'affleurement à partir du Sol 3076 sur des cibles qui se trouvent sur son écorce de teinte clair, et qui présente par endroit des veines minérales de sulfate de calcium. À l'aide de son outil d'abrasion RAT, le rover creuse un trou d'une profondeur de 3,6 mm sur la cible « Azilda 2 » aux Sols 3083 et 3085 (Figure 99:b et 101), dans l'espoir de trouver des matériaux de type argileux.

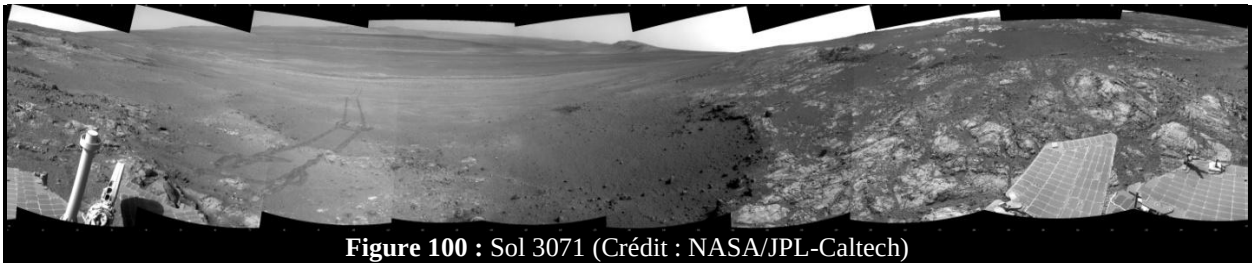


Figure 100 : Sol 3071 (Crédit : NASA/JPL-Caltech)

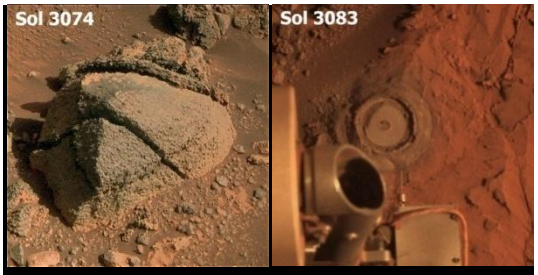


Figure 101 : Errington et Azilda 2
(Crédit : NASA/JPL-Caltech/Cornell University)

Le plancher qui recouvre le site de la petite colline « Matijevic Hill » (Sols 3060-3308) est parsemé d'un nouveau type de petites sphérules d'une grosseur de 3 à 4 millimètres de diamètre, dont les analyses effectuées par le spectromètre APSX ont dévoilées qu'elles étaient plus résistantes et pauvres en oxyde de fer, contrairement aux autres myrtilles d'hématite découvertes par le rover Opportunity jusqu'à présent, et elles résulteraient de concrétion de matériaux de type basaltique. L'équinoxe du printemps arrive le 30 septembre 2012 au Sol 3088, et le robot devra être très vigilant, car il s'agit d'une année qui est propice aux grandes tempêtes globales pouvant recouvrir entièrement la planète rouge. Dix jours plus tard après avoir effectué un très court déplacement de 0,6 mètre, l'astromobile amorce une campagne d'étude et d'analyse sur l'affleurement « Chelmsford » entre les Sols 3092-3098, incluant deux séances de brossages (Sol 3094 et 3096) (Figure 105). À partir du Sol 3098 le 10 octobre 2012, et durant les trois prochains mois de la mission, le rover Opportunity va faire un tour de reconnaissance du terrain

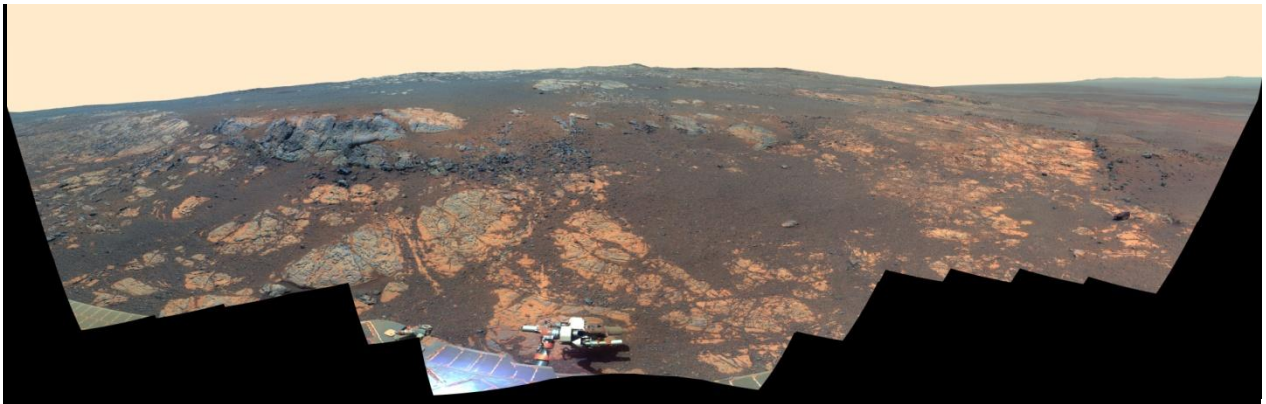


Figure 102 : Panorama Mattijevic Hill (Crédit : NASA/JPL-Caltech/Cornell/Arizona State Univ.)

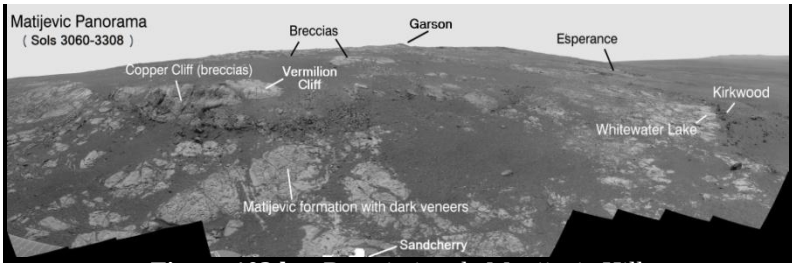


Figure 102 b : Description de Mattijevic Hill

pour évaluer le cadre géologique de la région en contournant par le nord-ouest, dans le sens contraire des aiguilles d'une montre, la zone du site géologique « Matijevic Hill » (Figure 100 en haut à gauche de la partir droite de l'image et Figure 102), tout en étudiant plusieurs cibles d'intérêts qui se trouvent sur le sol durant son trajet. La première séance d'analyse est exécutée sur l'affleurement « Sandcherry » situé à la base de « Copper Cliff » (Figure 102:b), l'affleurement se trouve en bas au centre de l'image juste sous le bras porte outil rotatif du rover, et que le rover va étudier et brosser entre les Sols 3137 et 3152 du 19 novembre au 5 décembre 2012 (voir aussi la Figure 105). L'astromobile en profite également pour entamer avec ses caméras panoramiques PANCAM le magnifique panorama couleur « Matijevic Hill » (Figure 102), qui présente les deux principales caractéristiques géologiques de la région qui sera étudiée par Opportunity. Soit « Copper Cliff » entre les Sols 3135 et 3151, il s'agit de l'affleurement rocheux sombre situé en haut au centre gauche de l'image formé de brèche d'impact d'origine basaltique (formation Shoemaker). Et de l'affleurement « Whitewater Lake » entre les Sols 3182 et 3202 lors du deuxième passage du rover, il s'agit de l'affleurement rocheux brillant de forme circulaire qui se trouve au centre de la partie droite de la figure 102 et en haut de la figure 103, et qui présente à sa surface une couche d'altération sédimentaire (formation Matijevic Hill). Durant ce temps, l'opacité de l'atmosphère martienne (facteur Tau) a commencé à augmenter sur le Sol 3133 le 16 novembre 2012, faisant passer le bilan électrique de 589 à plus de 897 watts heures, soit un gain d'énergie de plus de 34%.

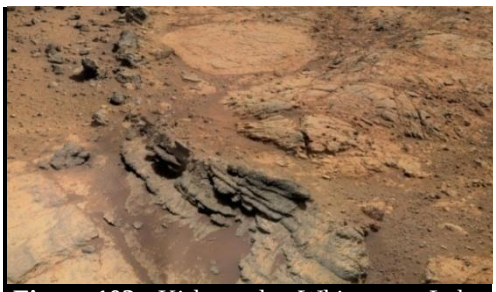


Figure 103 : Kirkwood et Whitewater Lake (Crédit : NASA/JPL-Caltech/Cornell Univ.)

Après avoir parcouru une distance de 334 mètres, dans le but de contourner et de prospecter les environs du site « Matijevic Hill », et pris le temps d'étudier l'affleurement « Sandcherry » entre les Sols 3137 et 3152. Le rover étudie les cibles baptisées « Onaping » et « Vermilion », qui se trouve à la base de l'affleurement rocheux « Copper Cliff » entre les Sols 3155 et 3182. Opportunity parcourt ensuite 13 mètres vers le nord-est et rejoint pour la deuxième fois l'affleurement rocheux de

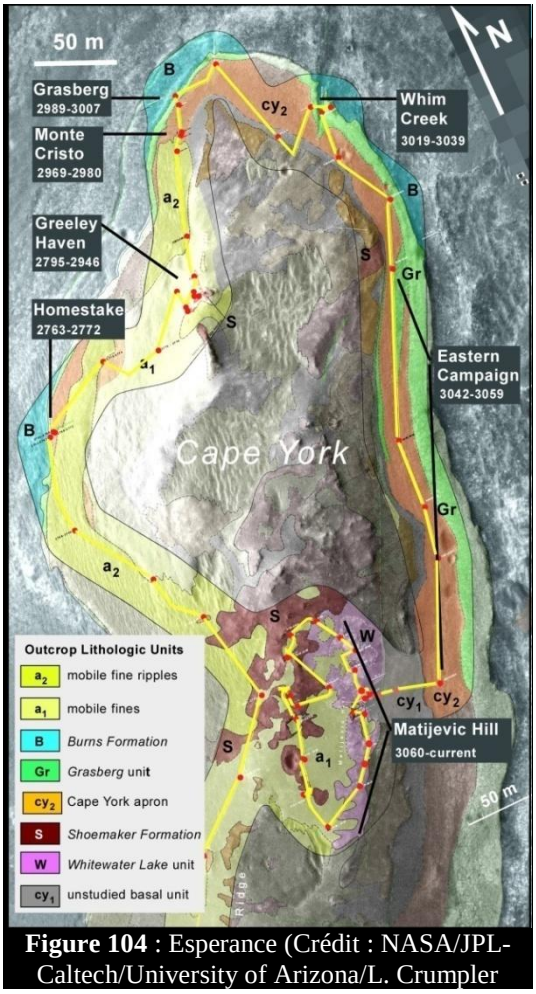


Figure 104 : Esperance (Crédit : NASA/JPL-Caltech/University of Arizona/L. Crumpler

teinte claire « Whitewater Lake » au Sol 3185 le 8 janvier 2013, afin d'étudier de nouveau les veines et les roches plates et claires qui se trouvent tout autour (Figure 103). Le même jour, le robot prend pour la deuxième fois au cours de sa mission sur Mars, une photo d'un petit tourbillon de poussière « Dust Devil » avec ses caméras de navigations avant (NAVCAM). Les recherches sur le terrain, qui avaient comme objectif de comparer l'aspect et la texture des roches avec la position des argiles détectées depuis l'espace par la sonde MRO en 2008. Ont permis de détecter pour la deuxième fois la présence de sulfate de calcium (probablement du gypse) à la surface des fines veines blanchâtres de l'ensemble des cibles « Ortiz » de l'affleurement rocheux « Whitewater Lake ». Les données ont été obtenues en janvier 2013 par l'APXS du rover lors de la deuxième rencontre avec l'affleurement. Et grâce à ce repérage minutieux et à l'analyse multi spectrale, les chercheurs de la NASA ont même été en mesure de confirmer à partir du 4 décembre 2012, de la présence in situ de minéraux argileux riche en fer (nontronite) sur le site de « Whitewater Lake », qui correspondait bien à l'endroit ou MRO avait découvert de la smectite, qui est un minéral hydraté appartenant à la famille des phyllosilicates. Il s'agit de l'un des principaux objectifs qui avaient été assignés au rover en le dirigeant vers le cratère « Endeavour » en 2008. L'équipe scientifique d'Opportunity a annoncé cette découverte seulement trois mois avant la découverte d'argile et de sulfates de calcium effectués par les instruments SAM et CheMin de l'astromobile Curiosity en mars 2013. Il s'agit d'une preuve de plus qui atteste que l'eau liquide à bien coulée sur la bordure nord-ouest du cratère « Endeavour », il y a de cela plusieurs milliards d'années et bien avant la formation du cratère. Dont l'impact serait à l'origine du soulèvement du sol qui a fait émerger en surface des dépôts d'argile plus ancien qui étaient enfouis plus profondément.

La présence des phyllosilicates et du sulfate de calcium dans les sédiments martiens, peut s'expliquer de deux manières selon les concentrations qui ont été observées sur les sites d'analyses. Il peut s'agir de la présence et de l'écoulement de l'eau neutre à la surface de la planète à l'époque très ancienne du Phyllosien (Noachien), située entre 4,5 et 4,2 milliards d'années. Dans ce cas, il s'agirait d'un milieu et d'un environnement qui aurait été beaucoup plus tempéré et beaucoup plus propice à l'apparition et au développement de la vie sur le sol martien que l'époque actuelle. Mais il peut s'agir également d'évènement beaucoup plus récent, et qui concernerait des processus d'infiltration d'eau qui remonte à travers des fissures suivit par des dépôts minérales qui survient lors de période d'éruption volcanique plus récente, ou lors d'impact de gros météorite ou d'astéroïdes sur le sol martien. La collision pulvérise les roches et les couches sédimentaires du lieu d'impact, et l'onde de choc qui se propage à grande vitesse toute autour sur de grande distance, fait fondre le pergélisol et libère l'eau qui est enfouis dans des

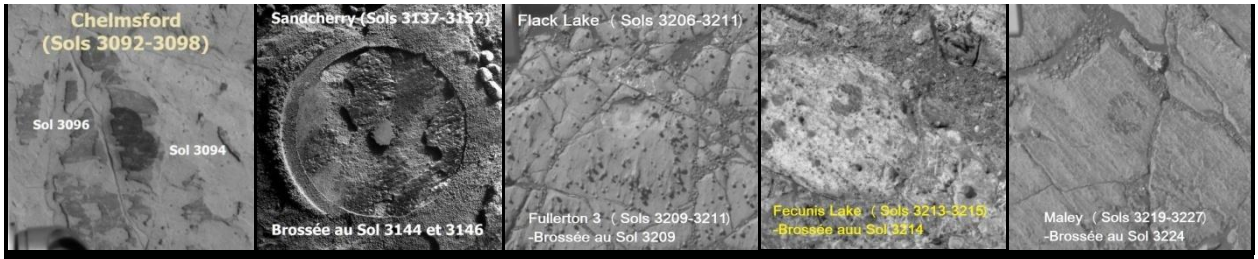


Figure 105 : Chelmsford, Sandcherry, Fullerton 3, Fecunis Lake et Maley (Crédit : NASA/JPL-Caltech)

nappes phréatique souterraine par simple écoulement de surface, ou encore par des processus qui sont reliés à l'hydrothermalisme de surface. Cette eau se charge par la suite de minéraux qui fini par se déposer dans les crevasses et les fissures quand l'eau se retire, laissant derrière des veines de dépôt minérale. La présence simultanée de sulfate de calcium et d'argile au même endroit, suggère que ces évènements sont plus récents que les époques correspondant aux grandes périodes d'activité volcanique du Theiikien (Hespérien), ou encore de l'époque plus ancienne du Phyllosien (Noachien) qui est associé aux argiles.

Le 29 décembre 2012 et le 18 janvier 2013, le robot Opportunity a vu sa production d'énergie légèrement augmenter grâce à deux petits "coups de vent" qui ont nettoyé un peu de poussière qui s'était déposées sur ses panneaux photovoltaïques. Au Sol 3201 le 24 janvier 2013, le rover Opportunity fête sa neuvième année d'exploration à la surface aride de la planète Mars, et entame déjà sa dixième année d'exploration sur Mars. L'astromobile quitte définitivement l'affleurement « Whitewater Lake » au Sol 3203 pour se diriger vers « Flack Lak » entre les Sols 3206 et 3211, et vers plusieurs autres affleurements que le robot va étudier le long de sa route. Soit « Fecunis Lake » entre les Sols 3213 et 3215, de « Maley » entre les Sols 3219 et 3227 (Figure 105), et de « Boxwork » entre les Sols 3233 et 3240. La cible de surface dénommée « Boxwork », présente une sorte de structure minérale érodée composée de fines veines blanchâtre et de zone d'altération le long des fissures qui se trouve dans la partie nord-ouest de l'affleurement « Big Nickel ». Durant cette enquête de surface et pour chacun des affleurements rocheux, le robot va étudier leur composition chimique avec son spectromètre APXS, prendre des photos avec l'imageur microscopique (MI), et pour certaines cibles brosser leur surface jusqu'au Sol 3224. Entre temps, le solstice d'été est arrivé neuf jours plus tôt sur le Sol 3231 le 24 février 2013, et le rover qui est près de « Boxwork » a eût de nouveau des problèmes d'amnésie avec sa mémoire flash sur le Sol 3235 (28 février 2013). Le même type d'évènement c'est également produit pour le robot Curiosity qui se trouve de l'autre côté de la planète dans le cratère « Gale ».

Après avoir effectué une mise à jour des logiciels du système informatique de bord d'Opportunity, dans le but de corriger le problème de mémoire. L'astromobile retourne de nouveau vers l'affleurement rocheux « Kirkwood » au Sol 3246, dans le but d'étudier le mystère qui entour les petites sphérules « New Berry » qui ont été observés à cet

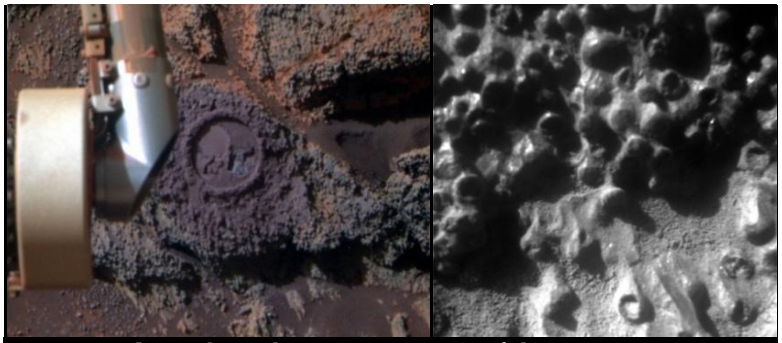


Figure 105 b : Kirkwood, "New Berry" trouvé dans "Sturgeon River 3" (Crédit : NASA/JPL-Caltech/Cornell)

endroit. Pour ce faire, le robot va polir la cible baptisée « Sturgeon River 3 » (Figure 105:b) qui se trouve sur la roche au Sol 3251 et au Sol 3253. Opportunity utilise l'imageur microscopique de son bras pour observer « Kirkwood » de plus près, puis analyser les résidus de poudre de roche avec ses différents instruments scientifique. Les « New Berry » semble êtres des sphérules d'impacts qui ont été créés lors de la collision d'astéroïdes qui ont creusés les gros cratères des alentours. La matière qui est alors éjectée et vaporiser à très haute température lors de la collision, prend alors la forme d'une gigantesque boule de feu. Le panache de fumé se dilate et la vapeur de roches qui le compose fini par se refroidir, et se condense sous forme de petites gouttelette vitreuses appelées sphérules qui se dépose au sol. La poussière finie par retombée et à recouvrir le sol pour former avec le temps une sorte de matrice de revêtement sédimentaires qui va cimenter le tout.

Figure 106 : Esperance (Crédit : NASA/ JPL-Caltech/Cornell/Arizona State Univ.)

Opportunity quitte définitivement « Kirkwood » au Sol 3255, et remonte vers le nord en direction d'une cible de surface qui se trouve sur une roche fracturée baptisée « Esperance » entre les Sols 3260 et 3306. L'objectif est de positionner l'astromobile devant un site d'étude intéressant, et de le préparer à passer à travers la cinquième conjonction solaire qui aura lieu entre les Sols 3273 et 3291 (du 8 au 26 avril 2013). Durant le trajet plusieurs événements de rafales de vents ont eu lieu sur les Sols 3255, 3256 et 3257, ayant pour résultats de nettoyé une partie de la fine poussière qui recouvrait les panneaux solaire du rover, et d'augmenter le bilan d'énergie de plus de 100 watts heures passant de 490 à plus de 590 watts heures. Par la suite, le robot Opportunity s'installe confortablement près de la cible de sol de teinte pâle baptisée « Esperance » au Sol 3260, et que l'on peut voir au centre de la partie supérieur de la figure 106, « Esperance » se trouve dans une région fracturée du site de « Boxwork » situé tout juste au nord-ouest de l'affleurement « Big Nickel ». Le rover prépare son spectromètre APXS et son imageur microscopique (MI) au Sol 3267, dans le but de faire de longue séance d'intégration sur la veine claire qui recouvrent « Esperance », et de prendre des photos en mode automatique durant les trois semaines que va durée la cinquième conjonction solaire. L'astromobile reçoit ensuite les commandes faisant partie de son programme d'activité pour les Sols à venir, et que le rover devra exécuter seul et de manière autonome durant la durée de la conjonction solaire. Le contact avec Opportunity reprend le 26 avril sur le Sol 3290, mais le robot ne répond pas aux commandes, car il avait déjà passé en mode de vieil automatique « safe mode » quatre Sol plus tôt. Le problème survient quand le robot cherche à écrire des données dans des secteurs corrompus ou défectueuses de la mémoire flash. La solution pour corriger le problème consiste à télécharger et d'installer des nouvelles mises à jour au Sol 3295, qui indique au rover de comment isolé l'emplacement de la zone de mémoire invalide, et de réamorcer le système informatique de bord du robot pour que ce dernier puisse repartir à neuf en tenant compte des nouvelles procédures de surveillances des zones de mémoires critiques. Le rover qui est de nouveau en pleine forme dès le lendemain, reprend aussitôt son étude du réseau de veines blanchâtres qui recouvrent « Esperance ».

Durant la semaine qui a suivit la cinquième conjonction solaire, une gigantesque tempête de poussière régionale s'est levée dans l'hémisphère Nord de la planète. Elle était située à la

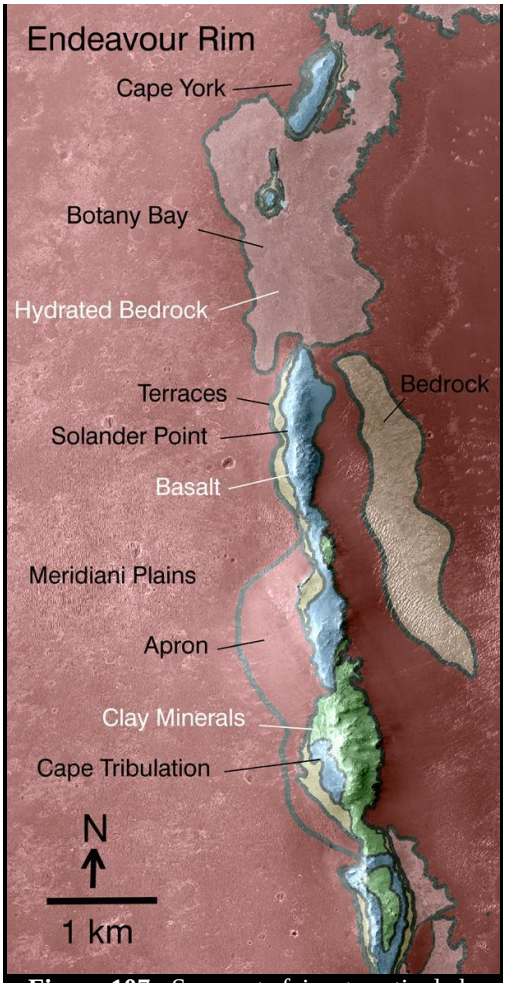


Figure 107 : Segments faisant partie de la crête nord-ouest du cratère Endearvour (Crédit : NASA/JPL-Caltech/JHUAPLl)

jonction des vastes plaines « Acidalia » et « Chryse », qui se trouve beaucoup plus à l'ouest de la position d'Opportunity, faisant grimper le facteur tau à 1,53 au Sol 3301 le 7 mai. Les analyses effectué sur « Esperance » par le spectromètre APXS, indique des valeurs plus élevées en aluminium et en silice et plus base en calcium et en fer, que toute les autres roches qui ont été examinées par le rover depuis sont arrivé sur Mars il y a neuf ans. Les premières analyses suggèrent qu'il s'agit de matériau argileux de type montmorillonite qui aurait fortement été altéré par l'eau avec un pH relativement neutre. Les analyses du spectromètre APSX indiquent que tous les échantillons étudiés à « Cape York » contiennent une teneur plus élevée en dioxyde de silicium (SiO_2), en oxyde d'aluminium (Al_2O_3) et en oxyde de sodium (Na_2O). Ses résultats suggèrent très fortement une altération de matériaux de type basaltique, comme l'olivine et le pyroxène dans un environnement aqueux avec un ph relativement neutre, et qui aurait par la suite favorisé la formation des argiles de type smectite[20]. La remontée d'une certaine quantité d'eau contenue dans des nappes phréatique faiblement acide et peu profonde à travers des fissures, lors d'activité météoritiques ou volcaniques et hydrothermale, auraient favorisée la nucléation des petites sphérules ou myrtilles d'hématite et la création des filons de sulfate. La circulation de l'eau chargée de sels et de minéraux en solution à travers les crevasses et les fissures des roches de « Copper Cliff » et de « Matijevic Hill », a favorisé la formation des dépôts sous forme de filons par la précipitation du sulfate de calcium. Le tout aurait été par la suite recouvert de brèches d'impactes, comme le dévoile la crête « Shoemaker Ridge » qui parcourt une partie du sommet de « Cape York », de « Copper Cliff » et de « Matijevic Hill », lors de la formation du cratère « Endeavour » ou des autres cratères qui se trouvent à proximités. Contrairement aux données recueillis le long du trajet effectué dans « Meridiani Planum » entre 2004 et fin 2012. Il s'agit d'une époque qui est antérieur à celle qui correspond aux grandes activités éruptives et plus acide de l'ère des sulfates du Theiikien/Hespérien, mais qui peut aussi être plus récente dans le cas d'activité hydrothermale. Il est également à noter que la silice et les argiles résultant de matériaux basaltiques rencontrées à « Esperance » et à « Whitewater Lake », pourraient correspondre à une époque qui est encore plus ancienne remontant au tout début de l'époque du Phyllosien/Noachien. Les indices donnés par les instruments d'Opportunity sur l'altération chimique des minéraux en milieu aqueux, ont fournis une preuve définitive sur l'existence d'une époque ayant subit l'activité de l'eau sur Mars.

Après avoir étudié et creusé à deux reprises dans « Esperence » au Sol 3301 et 3305 (Figure 107:b), et avec un facteur Tau qui redescend quelque peu sur les Sols suivant pour se

[20] Ancient Aqueous Environments at Endeavour Crater, Science janvier 2014, Vol 343.

Figure 107 b : Esperance Sol 3305 (Crédit : NASA/JPL-Caltech/Cornell/ Arizona State Univ.)

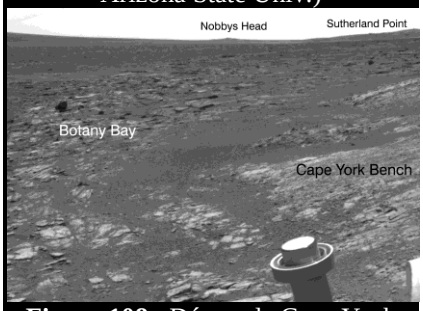


Figure 108 : Départ de Cape York (Crédit : NASA/JPL-Caltech)

maintenir à 1,21. L'astromobile peut reprendre la route vers le sud en direction de « Solander Point » au Sol 3308 le 14 mai 2013 (Figure 107). Il s'agit d'une nouvelle destination pour le rover qui se trouve à plus de 2,2 km plus au sud en direction de « Cape Tribulation ». Opportunity franchis son trente-sixième kilomètre au Sol 3314, puis le robot quitte définitivement les environs de « Cape York » deux jours plus tard sur le Sol 3316 le 22 mai 2013 (Figure 108). L'astromobile aura passé plus d'un an et neuf mois et demi à explorer les contours de « Cape York », tout en parcourant une distance de plus de 2 654 mètres en 635 Sols. Soit presque une année martienne complète de 687 jours terrestres, ou de 669 Sols en temps martien. Contre toute attendre, et après neuf ans et demi à explorer la surface de la planète rouge avec plus de 36 kilomètres au compteur. L'astromobile Opportunity qui est toujours en bonne état pour explorer la surface martienne, entame à présent une nouvelle aventure vers le sud tout en arpentant une partie des différents segments qui compose la crête nord-ouest du cratère « Endeavour ».

VERS SOLANDER POINT
(Sol 3316 à 3507)

Figure 109 : Solander Point, Nobby's Head et Sutherland (Credit : NASA/JPL/Cornell/Marco Di Lorenzo & Ken Kremer)

Le rover Opportunity qui vient de traverser les limites du terrain plus clair et plus vieux de « Cape York » au Sol 3316. S'aventure à présent à travers la plaine sombre de « Botony Bay » en direction de la petite colline « Sutherland Point » (Planche 22). Il s'agit d'un petit monticule de quelques mètres de haut sur environ 150 mètres de long, qui se trouve à plus de 170 mètres plus loin vers le sud-ouest, et que l'on peut voir à l'horizon dans la partie droite de la figure 109 qui a été prise le lendemain au Sol 3317, suivit au centre par « Nobby's Head » et d'une partie de « Solander Point » qui se trouve à gauche de l'image. Durant les trois semaines suivantes, l'astromobile va contourner le flanc nord-ouest de « Nobby's Head » entre les Sols 3325 et 3346, soit entre le 1er et le 21 juin (Figures 110, 111 et 112). Puis sous un ciel brumeux, le rover repart vers le sud à travers « Botany Bay », dans le but de rejoindre la base de « Solander Point » qui se trouve à environ un kilomètre plus loin vers le sud. Il s'agit d'une petite colline de 55 mètres de haut qui culmine au-dessus des plaines environnantes, et qui possède des petites pentes qui sont légèrement inclinées vers le nord faisant partie de la crête nord-ouest du cratère « Endeavour ».

Figure 110 : Arrivé à Nobby's Head au Sol 3333 (Crédit : NASA/JPL-Caltech/Damia Bouic)

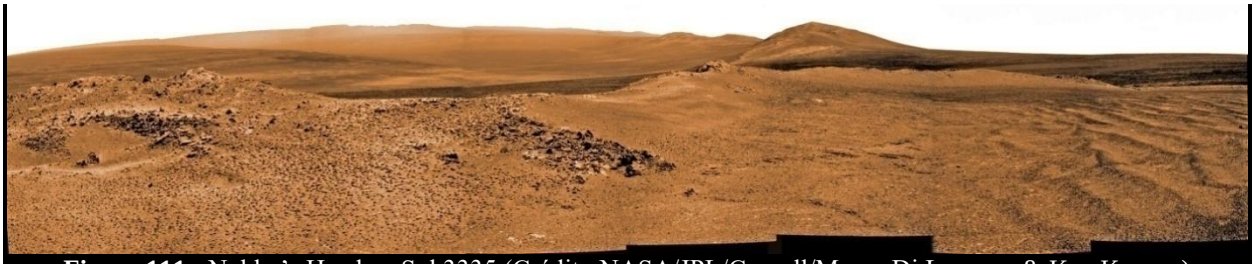


Figure 111 : Nobby's Head au Sol 3335 (Crédit : NASA/JPL/Cornell/Marco Di Lorenzo & Ken Kremer)

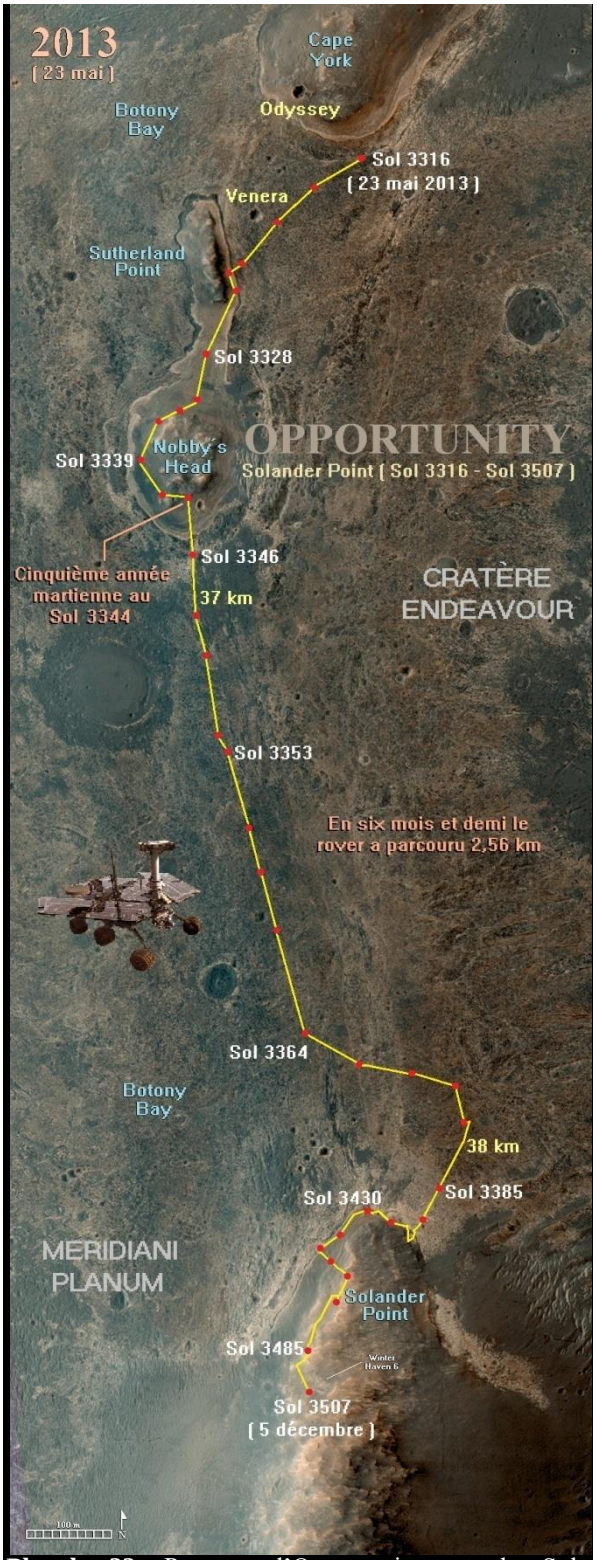


Planche 22 : Parcours d'Opportunity entre les Sols 3316 et 3507. La photo d'arrière-plan a été obtenue grâce aux données fournies par la caméra HiRISE de Mars Reconnaissance Orbiteur (MRO) le 8 juillet 2013. Position et trajet du rover guidés par les cartes de la Nasa et d'Eduardo Tesheiner.

Le rover est à la recherche de tel endroit montagneux avant l'arriver du prochain hiver martien (le sixième), dans le but d'optimiser l'orientation des panneaux solaires vers le soleil pour recharger ses batteries. Les flancs de « Solander Point » présentent différents empilement rocheux composées de plusieurs couches sédimentaires inclinées d'origine plus ancienne, et qui ont été dégagées lors de la création du cratère « Endeavour ». La couche de surface de « Meridiani Planum » est constituée en grande partie de dalle de grès claire riche en sulfates et en hématite (Burns formation), parsemé de dune de sable. À la base de « Solander Point », nous retrouvons une zone d'éboulis composée de champ de gros roché sombres qui semblent avoir dévalé la pente, et vers le sommet se trouve une couche sédimentaire composées de matériaux argileux. Il s'agit d'une couche sédimentaire beaucoup plus anciennes que ceux rencontrés dans le cratère « Eagle », « Endurance », « Victoria » et « Santa Maria ». « Solander Point » est le dernier sommet situé sur la pointe nord de « Cape Tribulation », qui délimite une bonne partie des remparts se trouvant sur la bordure ouest du cratère « Endeavour ». Le rover est toujours à la recherche de preuve sur la présence et de l'écoulement de l'eau sur la planète Mars. Et pour se faire le robot est à la recherche de couche sédimentaire et de roche, dont l'altération chimique permettrait de mieux discerner les différentes étapes de l'histoire géologique ayant existé jadis à la surface de la planète rouge.

Bilan de santé du rover : Le robot présente de plus en plus des signes de vieillissement, mais il est encore bien capable de mener à bien des expériences sur le sol martien. Concernant le bilan de santé de l'astromobile, il y a eut en premier lieu le problème rencontré par la roue avant droite en avril 2005 (Sol 433), avec un actuateur défectueux qui à coincer l'alignement de la roue de 7 degrés vers l'intérieur (Figure 125:b). La même année au mois de novembre (Sol 654), l'astromobile éprouve des difficultés dans l'exécution de

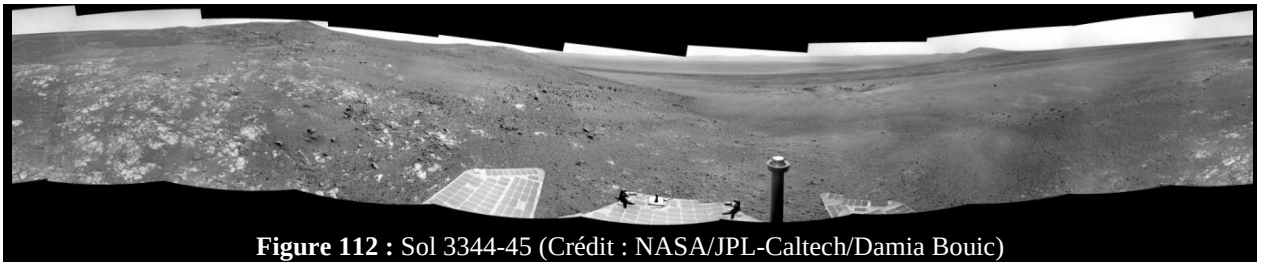


Figure 112 : Sol 3344-45 (Crédit : NASA/JPL-Caltech/Damia Bouic)

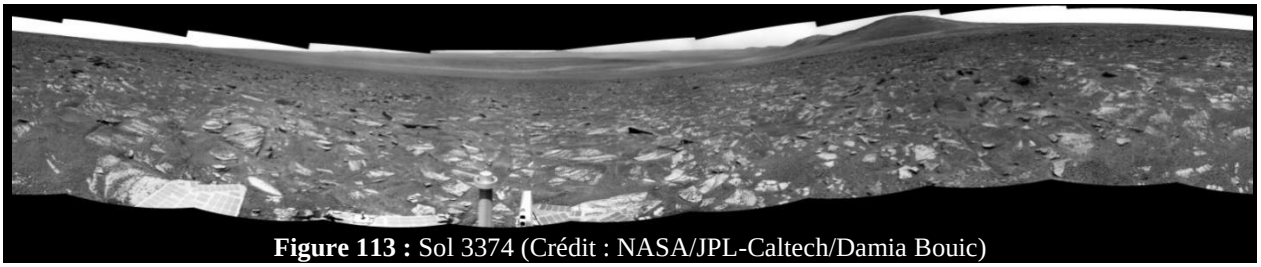


Figure 113 : Sol 3374 (Crédit : NASA/JPL-Caltech/Damia Bouic)

certains mouvements lors du déploiement du bras robotique, et qui a été causé par le bris d'un fil d'embobinage qui se trouve dans le premier moteur de l'articulation du bras au niveau du joint azimutal de l'épaule, et qui contrôle les mouvements latérale de gauche à droite. Ce bris a obligé le rover à ne plus replier le bras robotique sur lui-même, et de lui trouver une nouvelle position de rangement lors des déplacements sur le sol martien. L'astromobile perd l'usage d'un premier encodeur de son outil d'abrasion RAT qui servait de senseur et de télémétrie de contact au Sol 1045 le 1er janvier 2007. Ensuite, il y a eut la perte du spectromètre infrarouge Mini-TES qui est survenu lors de la tempête globale de juillet 2007 (entre les Sols 1205-1235), le miroir de son optique a été obstrué par une mince couche de poussière. Suivit de la perte du deuxième encodeur de la RAT vers le Sol 1334, qui servait à lancer la foreuse vers les cibles géologiques et à faire tourner les palmes. Viens ensuite la fatigue du moteur du joint azimutal de l'articulation de l'épaule qui revient de nouveau en avril 2008 (Sol 1491). Obligeant cette fois-ci le rover à laisser son bras robotique déverrouillé et déployé devant lui pour le reste de la mission. En février 2009 (Sol 1797), la roue avant droite surchauffe de nouveau et offre une résistance électrique de plus en plus élevé, obligeant le robot à conduire en marche arrière afin de mieux distribuer le lubrifiant et pour économiser l'usure prématurée du moteur de la roue. Il y a aussi la perte du spectromètre Mössbauer en janvier 2012 (Sol 2947), qui a épuisé sa source de rayonnement.

Le bilan de santé d'Opportunity ne serait pas complet sans y inclure les problèmes survenus avec la mémoire flash, et qui a été rencontré pour la première fois sur le Sol 3082 le 24 septembre 2012 près de l'affleurement rocheux « Whitewater Lake » à « Cape York ». Puis qui a été rencontré de nouveau 79 jours plus tard à partir du Sol 3161 le 15 décembre 2012, et de nouveaux aux Sols 3178 (1er janvier 2013) et 3183 (6 janvier 2013) lorsque que le rover se trouvait près de la brèche d'impacte « Copper Cliff ». D'autres événements d'amnésies sont survenus près de l'affleurement « Boxwork » au Sol 3235 le 28 février 2013 et près de l'affleurement rocheux de teinte plus claire « Esperance » au Sol 3286 le 22 avril 2013, qui s'est produit vers la fin de la cinquième conjonction solaire entre les Sols 3273 et 3291. Les problèmes avec la mémoire flash deviendront par la suite de plus en plus fréquents au court de la mission.

L'astromobile Opportunity fête son cinquième anniversaire martien au Sol 3344, et franchis son trente-septième kilomètre à la surface de la planète Mars sur le Sol 3348 le 25

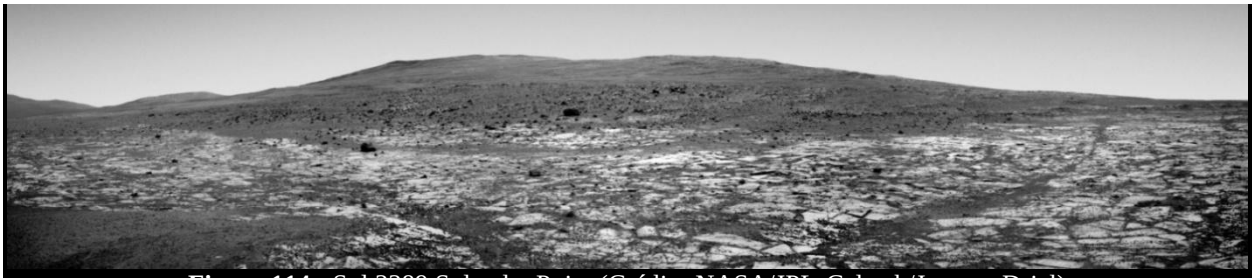


Figure 114 : Sol 3389 Solander Point (Crédit : NASA/JPL-Caltech/Jan van Driel)

Figure 115 : Sol 3389 Solander Point vue arrière (Crédit : NASA/JPL-Caltech/Jan van Driel)

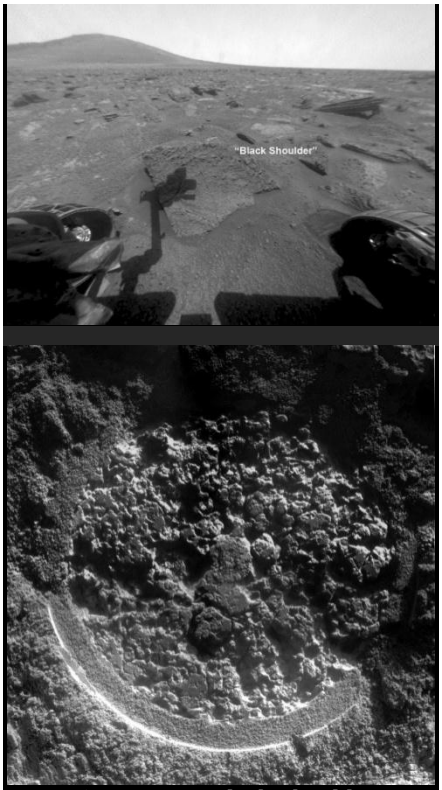


Figure 116 : Black Shoulder (Crédit : NASA/JPL-Caltech)

juin 2013. Et après avoir parcourus une distance de plus de 740 mètres en 18 Sols, incluant onze séances de roulement quotidiens sur le sol martien. Le rover tourne vers le sud-est au Sol 3366 le 13 juillet, afin d'aller rejoindre une portion de terrain plus sombre dénommée « Ray's Box » qui est recouvert de gros rocher composée de conglomérats de particule de forme arrondie. Après avoir enquêté sur plusieurs cibles de roches entre les Sols 3374 et 3385 (Figure 113) à l'aide de la caméra microscopique (MI) et du spectromètre APXS, avec en prime l'utilisation de la RAT au Sol 3382 pour polir l'affleurement rocheux « Black Shoulder » (Figure 116). Le rover reprend la route sur le Sol 3385, soit juste le lendamain après l'arrivé de l'équinoxe d'automne qui a eu lieu au Sol 3384 le 1er août 2013, et franchi le même jour le cap de son trente-huitième kilomètre parcourus à la surface de Mars. L'astromobile arrive finalement au pied du flanc nord-est de « Solander Point » deux jours plus tard au Sol 3387 le 4 août, après avoir parcouru une distance de 2,2 km en deux mois et demi depuis le départ du robot de « Cape York ». La figure 114 prise par les caméras NavCam sur le Sol 3389, dévoile le paysage qui se trouve devant le rover et pointant en direction du sommet de « Solander Point ». Tandis que la figure 115 nous montre la vue arrière, donnant vers l'intérieur de la cuvette du cratère « Endearvour » que nous retrouvons au centre de l'image. Le gros caillou sombre qui se trouve au centre de la figure 114 est « Mulla Mulla », que nous retrouvons également dans la partie droite de la figure 115, et le petit caillou sombre à gauche de « Mulla Mulla » est « Chees Tree ». La partie sombre de l'escarpement se trouvant à droite de « Mulla Mulla » sur la figure 114, est le site ou se trouve le champ de roche sombre « Coal Islande » (*l'île au charbon*) que le robot va rencontrer un peu plus tard au cours de sa mission sur Mars.

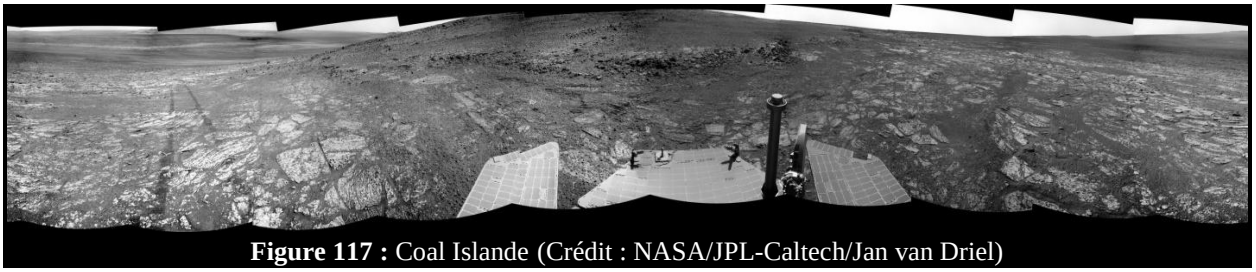


Figure 117 : Coal Islande (Crédit : NASA/JPL-Caltech/Jan van Driel)

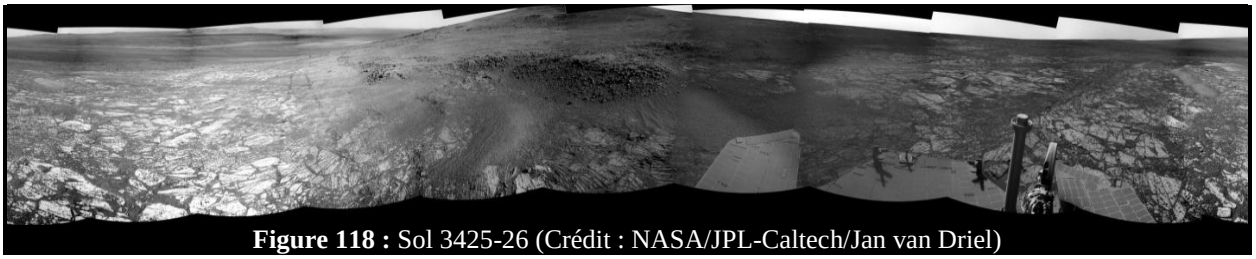


Figure 118 : Sol 3425-26 (Crédit : NASA/JPL-Caltech/Jan van Driel)

Après avoir étudié les pavés d'affleurements « Red Pocker » entre les Sols 3390 et 3391, et « Tick Bush », une roche d'origine basaltique qui se trouve cinq mètres plus loin entre les Sols 3392 et 3398. Opportunity en profite pour observer un alignement céleste qui se produit que très rarement dans le ciel martien et qui a eu lieu au Sol 3396 le 12 août, mais que les appareils photos du robot ont cependant manqué. Il s'agit de l'occultation de la petite lune « Deimos » (qui signifie « effroi ») d'un diamètre d'environ 12,6 km et évoluant sur une orbite éloigée à plus de 20 500 km de la surface martienne quelle effectue en 30,3 heures, par la plus grande lune « Phobos » (qui signifie « peur ») d'environ 22 km de diamètres et qui se déplace sur une orbite plus basse à seulement 6 000 km de la surface quelle effectue en 7,6 heures. L'astromobile rejoint ensuite la roche plate et claire dénommée « Platypus » (*ornithorynque*) au Sol 3400. Il s'agit d'une roche qui fait partie de la formation « Grasbergs » composé de grès riches en sulfates et en chlore, et qui caractérise la lithologie des terrains de matériau claire de quelques mètres de large sur quelques dizaines de centimètre d'épaisseur qui entoure la base des collines se trouvant sur les remparts du cratère « Endeavour ». Le rover utilise de nouveau son outil d'abrasion (RAT) sur le Sol 3403 le 20 août, afin de polir et d'étudier la surface de la roche (Figure 121:A). L'astromobile longe ensuite l'escarpement de 80 mètres de long sur 40 centimètres de haut qui délimite les terrains clairs des terrains plus sombres qui entoure une partie de la base du flanc nord-est de « Solander Point », et qui repose sur une énorme strate composé de conglomérat de gros rocher d'une dizaine de centimètre de diamètre coincé dans une matrice de matériau plus fin, sur lequel repose une zone d'éboulis remplis de roches et de gros cailloux qui semblent avoir déboulés des pentes de la colline.

À partir du Sol 3407, le rover contourne la pointe nord de « Solander Point » dans le sens antihoraire, dans le but de se diriger vers des pentes plus douces qui se trouve sur le versant nord-ouest, et qui donne un accès plus sécuritaire pour la conduite du robot vers le sommet de la colline d'une hauteur de 40 mètres. Sur le chemin entre les Sols 3410 et 3425 (Figure 117 et 118), le rebot Opportunity s'arrête quelque temps pour étudier plusieurs cibles (« Dibbler », « Monjon ») situées près d'un champ de roche sombre baptisée « Coal Islande » (*l'île au charbon*). Après avoir rejoint et étudié la petite roche « Poverty Bush » entre les Sols 3426 et 3429, l'astromobile reprend la route vers l'ouest pour se rendre à la pointe nord de « Solander Point » au Sol 3430 le 16 septembre. Le lendemain, l'astromobile tourne vers le sud-ouest et

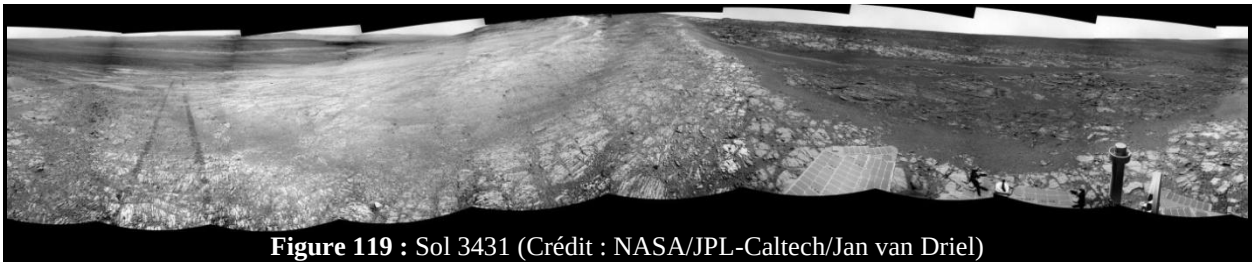


Figure 119 : Sol 3431 (Crédit : NASA/JPL-Caltech/Jan van Driel)

Figure 120 : Sol 3451 (Crédit : NASA/JPL-Caltech/James Sorenson)

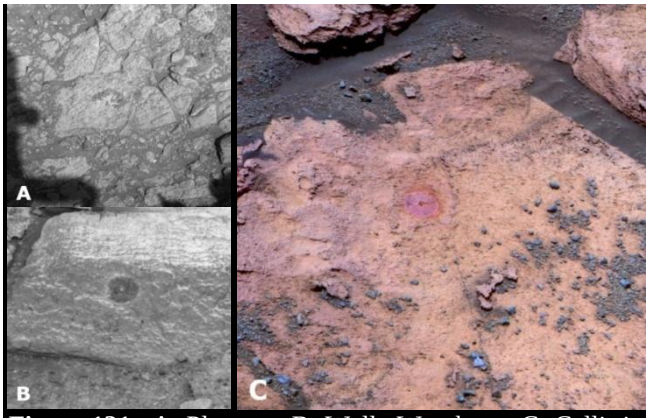


Figure 121 : A- Platypus, B- Wally Wombat et C- Callitris (Crédit : NASA/JPL-Caltech/Cornell/ASU)

profite de l'occasion pour faire un nouveau panorama des lieux (Figure 119), dans lequel nous pouvons voir la diversité des terrains explorés par le rover et qui recoupent différentes époques de l'histoire géologique martienne. Le rebot se déplace sur une courte distance de deux mètres vers l'ouest au Sol 3432, pour étudier la roche « Wally Wombat » durant les quatre jours suivants jusqu'au Sol 3436, avec en prime l'utilisation de son outil d'abrasion RAT au Sol 3434 pour polir et étudier de nouveau la roche (Figure 121:B). Le rover se déplace ensuite de 70 mètres vers le sud-ouest entre les Sols 3437 et 3441, avant de rejoindre sa prochaine cible de roche qui se trouve sur le pavé d'affleurement « Callitris ». L'astromobile va dépoussiérer la cible en effectuant un polissage de la surface de la roche avec son outil d'abrasion RAT au Sol 3444 (Figure 121:C), et de l'étudier par la suite durant plusieurs jours jusqu'au Sol 3450. Le robot mobile reprend ensuite la route dans l'objectif d'aller explorer les environs de son prochain site d'hivernage qui se trouve plus au sud, dans le but de trouver d'éventuelles cibles à étudier à l'endroit ou le spectro-imageur infrarouge et visible CRISM (Compact Reconnaissance Imaging Spectrometer for Mars) de MRO a observé depuis l'espace la signature de minéraux argileux. Le rover se doit de rester très prudent et de se préparer à réduire au maximum ses activités et ses déplacements à la surface durant le long hiver martien.

Sur le Sol 3451 le 8 octobre (Figure 120), le rover reprend la route vers le sommet après avoir étudié la zone de contacte plus claire qui entoure la base des collines des remparts qui bordent le contour du cratère « Endeavour » jusqu'au Sol 3456. Il s'agit d'une sorte d'interface lithologique comprise entre les anciennes roches du Noachien daté de 3,7 milliards d'années et des plaines sombres adjacentes beaucoup plus récente de « Meridiani Planum » daté de l'Amazonien. La couche géologique du Noachien étudié par Opportunity fait partie de la formation Grasberg, elle est composée essentiellement de grès riche en sulfate et en chlore qui

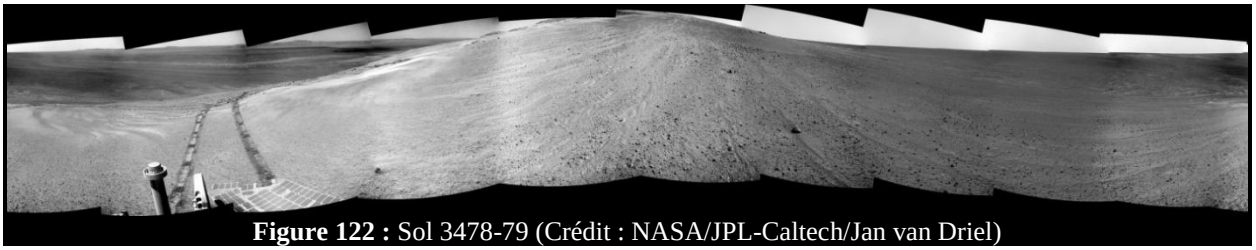


Figure 122 : Sol 3478-79 (Crédit : NASA/JPL-Caltech/Jan van Driel)

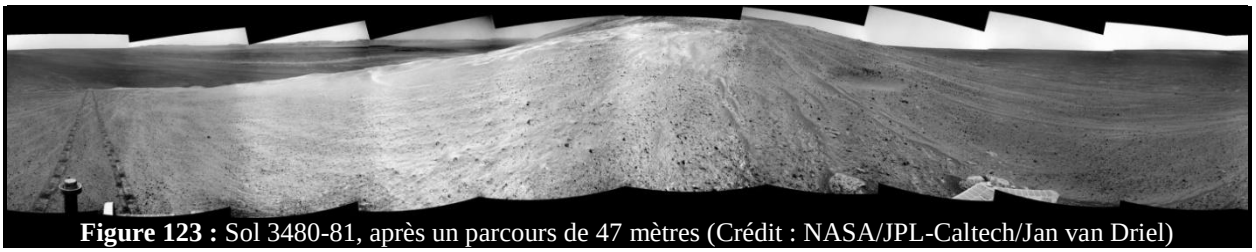


Figure 123 : Sol 3480-81, après un parcours de 47 mètres (Crédit : NASA/JPL-Caltech/Jan van Driel)

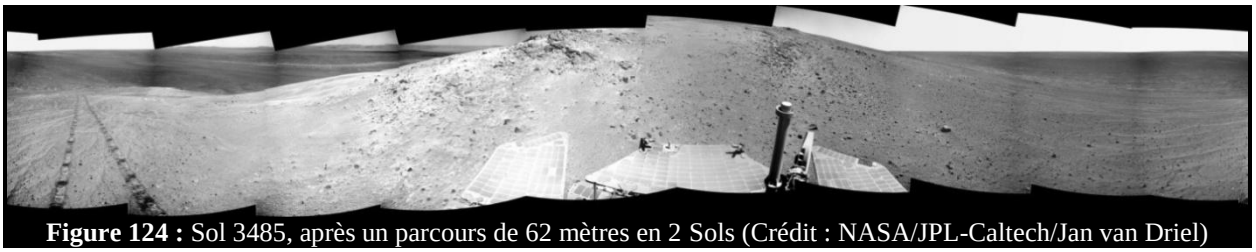


Figure 124 : Sol 3485, après un parcours de 62 mètres en 2 Sols (Crédit : NASA/JPL-Caltech/Jan van Driel)

évoque l'époque ou Mars était plus chaude et humide. Tandis que la couche géologique de l'Amazonien fait partie de la formation Burns, composé essentiellement de dalle de grès riche en sulfate partiellement recouvertes de dunes de sable fins et de concrétion minérale d'hématite de forme sphériques dénommé « Myrtille ». Le rover Opportunity va imiter l'exploit du robot Spirit de 2005, qui a été le premier engin construit par l'homme à gravir les pentes d'une petite colline située sur une autre planète jusqu'à son sommet, et entame pour la première fois l'ascension des pentes situées sur le flanc nord-ouest de « Solander Point » au Sol 3457. Il s'agit du plus haut relief que l'astromobile va escalader avec une hauteur de plus de 40 mètres, soit la moitié des 80 mètres dans le cas de Spirit lors de l'ascension de la coline « Husband Hill » dans le cratère « Gusev ». Le but est d'escalader les pentes douces qui se trouvent sur le flanc nord-ouest de « Solander Point », afin de rejoindre le sixième site d'hivernage qui se trouve encore à plus de 200 mètres plus loin vers le sud. Le rover se dirige ensuite vers l'affleurement rocheux dénommé « Kangoroo Paw » ayant comme objectif de l'étudier plus en détaille entre les Sols 3459 et 3465, incluant une séance de brossage sur la cible de surface baptisée "Spinifex" au Sol 3460, suivit d'une longue intégration de plusieurs Sols pour le spectromètre APXS. Opportunity poursuit l'ascension des pentes de la colline au Sol 3466 en se dirigeant vers la cible « Baobab », qui se trouve sur l'affleurement « Waratah », et que le robot rejoint dès le lendemain pour l'étudier jusqu'au Sol 3470. L'astromobile tourne ensuite vers le sud-ouest au Sol 3471, et poursuit sa randonnée durant les deux semaines suivantes en parcourant une distance de 132,4 mètres jusqu'au Sol 3485 en longeant la crête « Murray Ridge ». La crête longe le sommet comme une épine dorsale (Figure 122 à 124) et elle a été nommée en l'honneur de Bruce C. Murray qui est le co-fondateur de la Planetary Society avec Carl Sagan.

Le rover cherche à maintenir le plus possible l'inclinaison de ses capteurs solaires orienté

Figure 125 : Moreton Island
(Crédit : NASA/JPL-Caltech/Cornell/ASU)

vers le nord en direction du soleil, et ceci afin de favoriser l'amélioration de la production d'énergie pour la recharge de ses batteries. Au Sol 3472 le 30 octobre 2013, la production d'énergie tombe pour la première fois sous la barre des 300 watts/heures à l'entrée du sixième hiver martien, avec un bilan d'énergie de seulement 299 watts/heures. Le bilan d'énergie va cependant remonter quelque peu durant les semaines suivantes, puis redescend de nouveau sous la barre des 300 watts/heurs au Sol 3507 le 5 décembre 2013, avec une production de seulement 270 watts/heures. Après avoir étudié et contourné le dépôt de fine poussière dénommé « Yellow-Bellied Glider » entre les Sols 3473 et 3477, qui présente une composition comparable au premier dépôt de poussière « Houche » rencontré au Sol 60 et a celui de « North Pole » rencontré à « Cape York » lors du cinquième site d'hivernage effectué à « Greeley Haven ». L'astromobile rejoint l'affleurement rocheux de teinte sombre « Moreton Island » qu'il étudie par la suite entre les Sols 3496 et 3505 (Figure 125), et découvre que l'affleurement contient des minéraux argileux à base d'aluminium. Opportunity va parcourir les 50 derniers mètres vers le sud-est sur les deux Sols suivant, et rejoint finalement l'emplacement de son sixième site d'hivernage le 5 décembre 2013 au Sol 3507, qui a été baptisée pour l'occasion « Cook Haven ». Il s'agit de l'un des endroits ou les spectromètres de l'orbiteur MRO suggère la présence de minéraux argileux. En six mois et demi le rover aura parcouru plus de 2,56 km depuis son départ de « Cape York ».

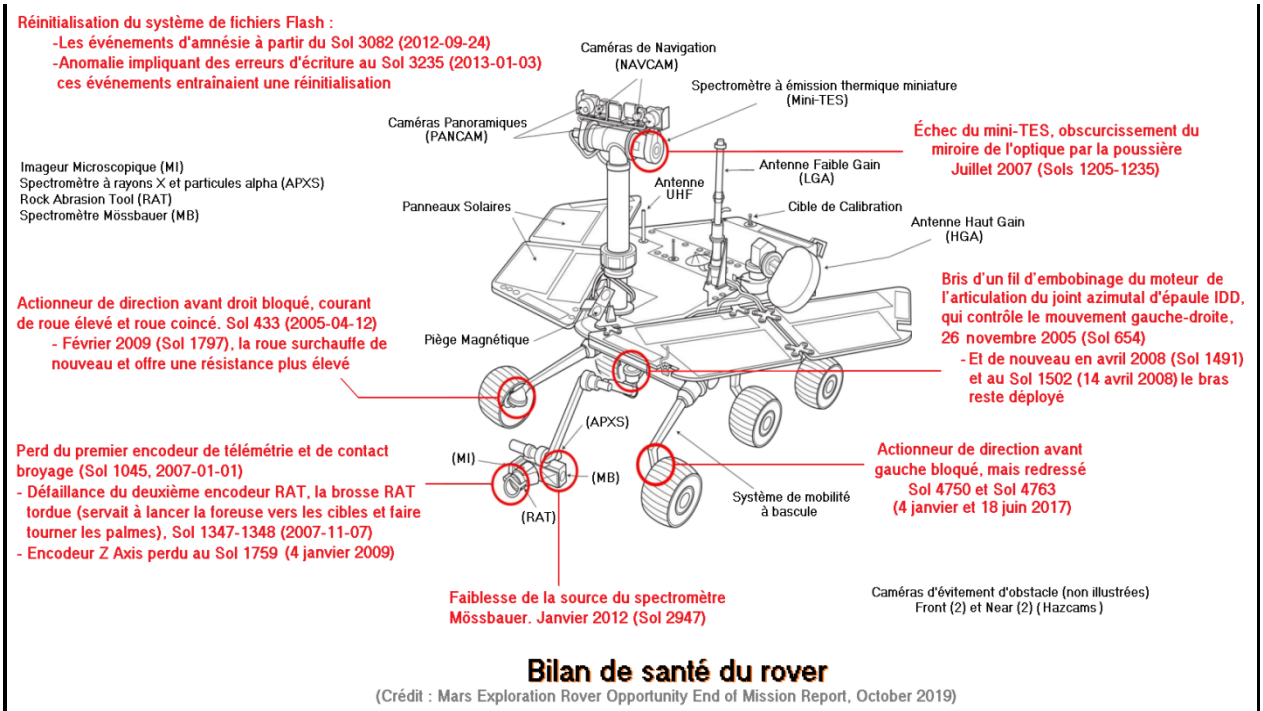


Figure 125 b : Jet Propulsion Laboratory California Institute of Technology Pasadena, California

LA DIXIÈME ANNÉE (Cape Tribulation) (Sol 3508 à 3911)

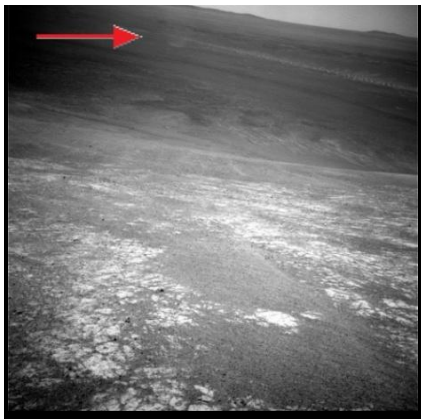


Figure 126 : Dust Devil au Sol 3514 (Crédit : NASA/JPL-Caltech)

Après avoir effectué un court déplacement vers le nord-est sur le Sol 3512 le 10 décembre 2013. Opportunity rejoint son sixième site d'hivernage « Cook Haven », qui se trouve près du sommet de « Solander Point » et de la crête de « Murray Ridge », dans une petite dépression de forme ovale de 30 mètres de diamètre (Planche 23). L'activité principale du rover aux cours des prochains mois, en plus de maintenir le plus possible ses panneaux solaires incliné vers le nord pour favoriser l'amélioration de la production d'énergie, sera d'étudier les environs dans le but de dresser une carte plus détaillée des lieux, tout en effectuant à l'occasion de court déplacement sur le terrain pour économisé son énergie. Deux jours plus tard sur le Sol 3514 (12 décembre 2013), le rebot Opportunity pointe ses caméras de navigation vers l'horizon nord-est pour prendre des images en direction du plancher intérieur de la cuvette du cratère « Endearvour », et surprend un nouveau « Dust Devil » en plein activité sur la planète Mars (Figure 126 vers le centre haut). Il s'agit du troisième « Dust Devil » que le rebot réussis à prendre en image depuis le début de sa mission sur la planète Mars, les deux premier ont été photographiés aux Sols 2301 (2010) et 3182 (2013). La distance du tourbillon de poussière est estimé à trois kilomètres vers l'intérieur de la cuvette du cratère « Endeavour », avec une hauteur moyenne de 230 mètres. D'autres événements reliés aux tempêtes de vents ont eu lieux plus tard sur les Sols 3533 et 3534 qui ont quelque peu nettoyés les panneaux solaires du rover, faisant passer le bilant d'énergie de 334 watts/heure au Sol 3532 (31 décembre 2013) à plus de 371 au Sol 3534 le 2 janvier 2014, soit une hausse de plus de 10%.

Figure 127 : Pinnacle Island au Sol 3536, 3540 et 3568 (Crédit : NASA/JPL-Caltech/Cornell/Midnight Planets)

Après avoir passé presque une semaine d'immobilité sur un site qui surplombe les plaines environnantes à plus de 40 mètres d'altitude. Le temps était venu d'étudier les roches qui se

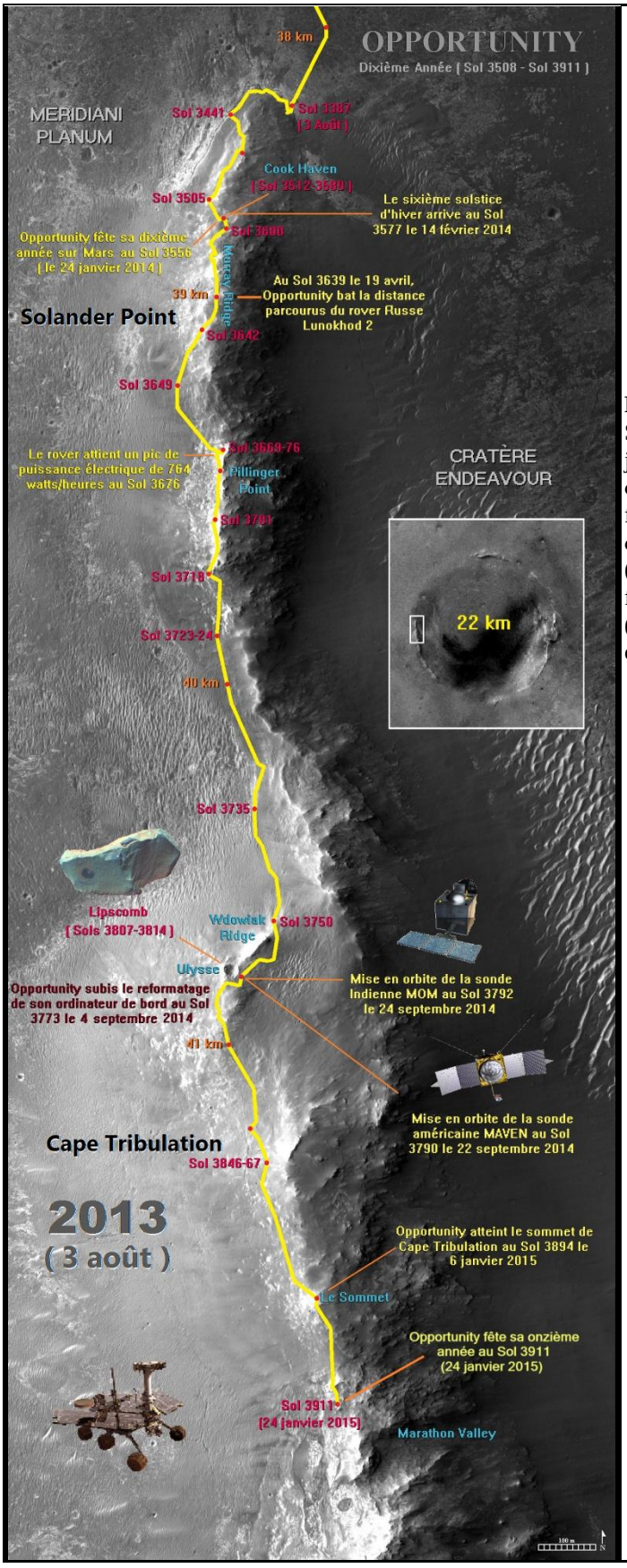


Planche 23 : Parcours d'Opportunity entre les Sols 3508 et 3911 du 6 décembre 2013 au 24 janvier 2015 (403 Sols, 1 an et 25 jours). La photo d'arrière-plan a été obtenue grâce aux données fournies par la caméra HiRISE et le spectromètre d'imagerie infrarouge compacte CRISM (Compact Reconnaissance Imaging Spectrometer for Mars) de Mars Reconnaissance Orbiteur (MRO). Position et trajet du rover guidés par les cartes de Phil Stooke.

Figure 128 : Sol 3555, dixième anniversaire (Crédit : NASA/JPL-Caltech/Jan van Driel)

trouvent a proximités du pavé d'affleurement « Cap Durby » entre les Sols 3521 et 3540, et de préparer un vaste panorama des lieux. Une nouvelle roche de teinte blanchâtre de 4 cm de large baptisée « Pinnacle Island », composée de sulfate à l'extérieur et de couleur rouge foncé à l'intérieur, est apparue subitement sur les clichés pris par le robot au Sol 3540 (8 janvier 2014), mais qui n'était pas présente sur les images qui ont été prises sur les Sols précédents (Figure 127). Après l'étude du pavé d'affleurement dénommé « Cape Elisabeth » entre les Sols 3540 et 3548, incluant une séance de brossage sur le Sol 3541. Opportunity cible de nouveau la roche « Pinnacle Island » qui se trouve juste en dessous, afin de tenter d'élucider cette histoire. Les instruments du rover (APXS et MI) indiquent que la composition minéralogique se trouvant à l'intérieur de la roche est quelque peu différente de celle qui a été rencontrée jusqu'ici, avec une forte teneur en soufre, en magnésium et en manganèse. La forte présence de ses minéraux suggère que la roche s'est formée dans un milieu hydrothermal.

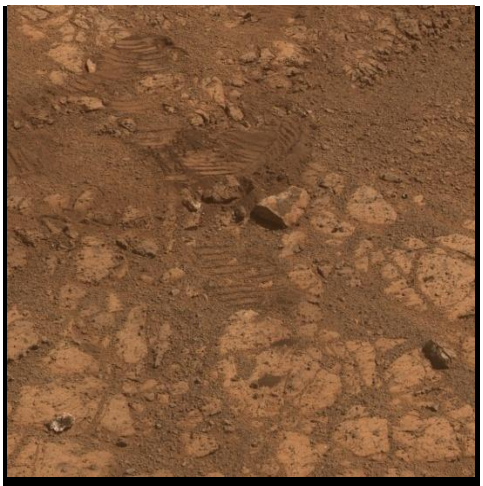


Figure 129 : Stuart Island Sol 3567 (Crédit : NASA/JPL-Caltech/Cornell/ASU)

Opportunity fête son dixième anniversaire sur la planète Mars au Sol 3556 le 24 janvier 2014 (Figure 128), avec à son actif plus de 187 000 images brutes. Il s'agit d'une réussite et d'un événement technologique et scientifique extraordinaire, qui est sans précédent dans toute l'histoire de l'exploration spatiale. L'astromobile se déplace ensuite de 3 mètres vers le nord-est au Sol 3566 en direction du pavé d'affleurement « Green Island », incluant une séance de brossage au Sol 3569 le 7 février 2014 pour offrir une surface propre à ses différents instruments. L'analyse des images de la portion du terrain qui se trouvait sous le rover, indique que « Pinnacle Island » est en fait un morceau de la roche « Stuart Island » qui à la même structure et qui présente la même composition minéralogique (Figure 127 : au centre de l'image de droite). La roche s'est brisée au contact de la roue avant-gauche quand Opportunity a fait pivotées ses roues-avant à la suite du dernier déplacement exécuté sur Mars au Sol 3512 le 12 décembre 2013, soit juste après avoir effectué l'étude de la zone de la brèche d'impacte ou se trouve l'affleurement « Cap-Douglas ». L'astromobile avait tourné sur lui-même au Sol 3512 et parcouru une courte distance de 6,6 mètres vers le nord-est. La roche « Stuart Island » qui se trouvait juste à la fin du parcours programmé du rover (Figure 129), s'est alors brisée au contacte de la roue avant-gauche, et quand le rover a fait pivoté ses roues sur place à la fin du déplacement, un morceau de la roche a glissée dans la roue. Lorsque que le robot s'est déplacé de nouveau au Sol 3540 sur une courte distance d'environ un mètre vers le nord-est. Le morceau de la roche qui était coincée dans la roue à ensuite tombée sur le sol martien, et s'est déposée à l'endroit ou elle a été photographié sur le Sol 3540.

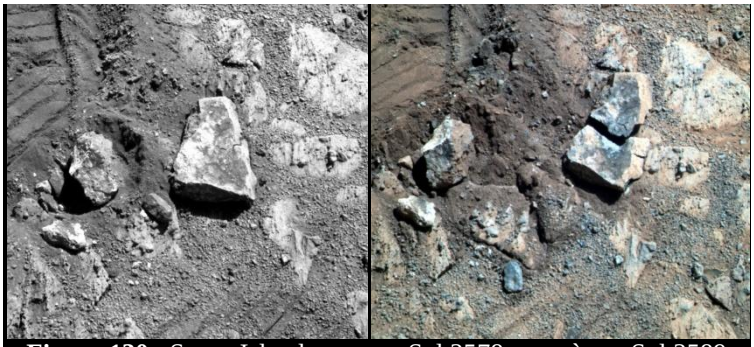


Figure 130 : Stuart Island avant au Sol 3578 et après au Sol 3589
(Crédit : NASA/JPL-Caltech/Cornell/Midnight Planets)

Après l'étude et le brossage de la roche « Green Island » entre les Sols 3567 et 3571 (Figure 135:A). L'astromobile revient quelque peu sur ses pas pour se diriger à nouveau vers « Stuart Island », dans le but d'effectuer une vaste campagne d'étude et d'analyse de la roche jusqu'au Sol 3578. Le solstice du sixième hiver martien arrive sur le Sol 3577 le 14 février 2014, et le bilan énergétique du robot est meilleur que les quatre derniers hivers (depuis 2005). Ce qui permet aux contrôleurs d'Opportunity d'envisager des déplacements plus long et de reprendre l'exploration en direction du sud, vers une zone de sédiment plus claire qui se trouve à environ 600 mètres de distance. Le lendemain sur le Sol 3578, le rover se déplace sur une courte distance de 1,6 mètre vers l'est dans le but d'aller écrasée un petit amas de cailloux baptisée « Sledge Island ». Et une semaine plus tard après avoir étudier les débris, l'astromobile sépare les fragments de la roche en effectuant des manœuvres de pivotement de 90 degrés avec sa roue-avant droite au Sol 3585, puis le rover analyse les débris durant les jours suivants. Au Sol 3589, Opportunity se déplace à nouveau vers « Stuart Island », et passe à trois reprises sur la roche avec sa roue-avant gauche pour l'écraser (Figure 130). La roche finie par se caser en deux sous le poids du robot, et après avoir terminée l'inspection de la roche au Sol 3593. L'astromobile quitte définitivement son sixième site d'hivernage « Cook Haven », en se déplaçant sur une courte distance vers le sud en direction de l'escarpement « McClure-Beverlin » pour y effectuer quelques inspections de sol. La première séquence d'étude du terrain commence avec une courte séance de polissage avec l'outil d'abrasion RAT d'Opportunity, sur une cible qui se trouve sur le pavé d'affleurement « Turnagain Arm » au Sol 3598 (Figure 135:B), et qui sera suivit de son analyse jusqu'au lendemain le 9 mars 2014. Suivra ensuite l'étude de la roche « Augustine » entre les Sols 3601 et 3603, qui se trouve un peu plus loin au sud près de « Cape Upright », et qui est situé dans un champ de gros cailloux aux arrêtes très anguleux qui recouvre la pente nord de « McClure-Beverlin ».

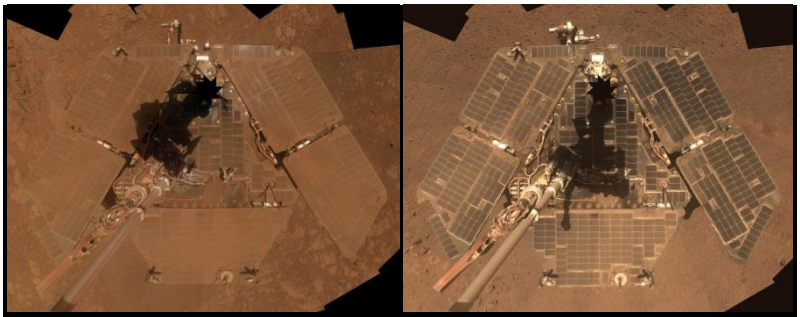


Figure 131 : Autoportrait aux Sols 3538 et 3613
(Crédit : NASA/JPL-Caltech/Cornell Univ/Arizona State Univ)

Le rover tourne ensuite vers le sud-ouest pour longer l'escarpement « McClure-Beverlin » sur environ 40 mètres entre les Sols 3609 et 3618, avant de reprendre la route vers le sud au Sol 3621. Entre temps vers la fin du mois de mars, des nouvelles rafales de vent ont balayés une grande partie des poussières qui recouvraient les panneaux solaire d'Opportunity au Sol 3613 le

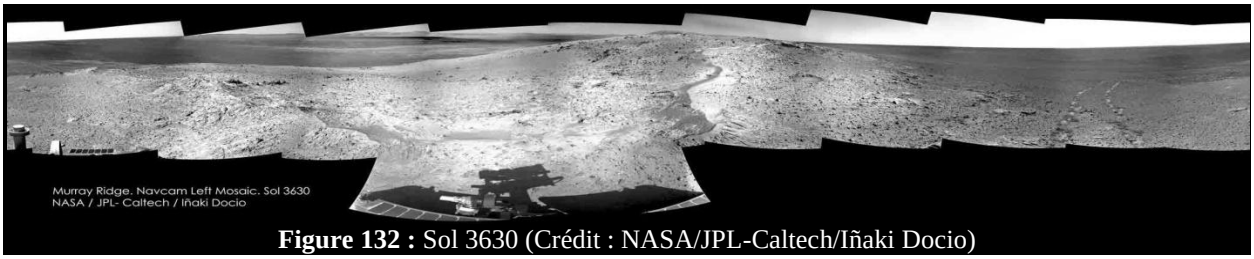


Figure 132 : Sol 3630 (Crédit : NASA/JPL-Caltech/Iñaki Docio)

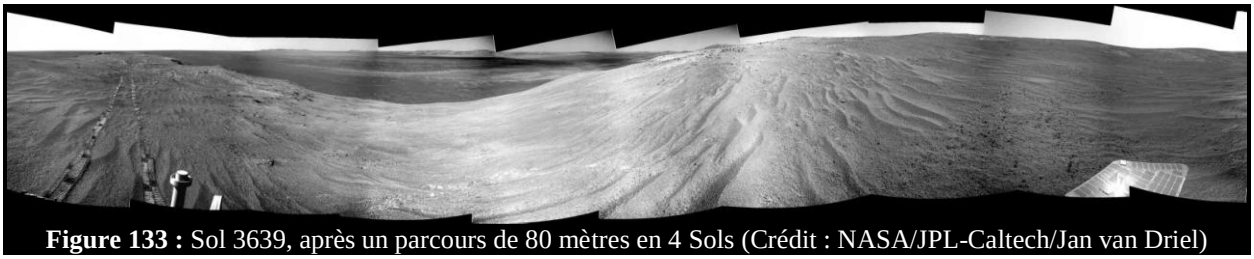


Figure 133 : Sol 3639, après un parcours de 80 mètres en 4 Sols (Crédit : NASA/JPL-Caltech/Jan van Driel)

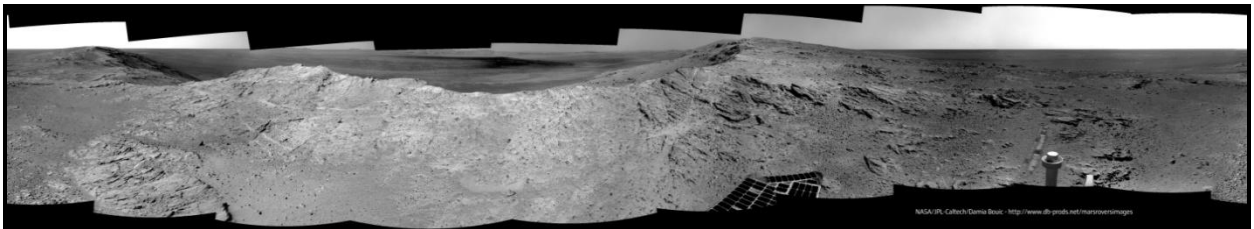


Figure 134 : Sol 3659, Pillinger Point après un parcourt de 446 mètres en 10 Sols (ou séance de conduite) (Crédit : NASA/JPL-Caltech/Damia Bouic)

23 mars, faisant montée la puissance électrique à 625 watts/heure, soit près de 67% de la puissance électrique qui était fournis au tout début de la mission en 2004. Entre le 15 janvier et le 13 mai 2014, durant le début du sixième hiver martien. La puissance de l'astromobile est passée de 353 watts/heure à son plus bas minimum au Sol 3547 à plus de 764 watts/heure à son plus haut maximum au Sol 3676 (Figure 131), avec un facteur Tau sur la qualité atmosphérique de 0,613 et un facteur d'accumulation de poussière sur les panneaux solaires de 0,942. Soit une augmentation de puissance de plus de 52% sur un interval de quatre mois seulement. Pour rappel, les plus hauts pics de puissance des rovers ont été atteints en pleine saison estivale, celui d'Opportunity a été obtenu au Sol 2 avec 932 watts/heure, et au Sol 591 pour Spirit avec un plus haut pic de puissance de 994 watts/heure.

Après avoir effectué deux petites pauses pour faire l'étude des environs de l'affleurement rocheux baptisée « Hoonah » entre les Sols 3621 et 3626. Le robot prend le temps d'entamer un nouveau panorama noir et blanc des lieux avec les caméras de navigations au Sol 3630 le 10 avril (Figure 132). On peut voir sur l'image de la figure 132 en partant de la gauche vers la droite : la cuvette de 300 mètres de profondeur du cratère « Endeavour » avec « Cape York » qui se trouve au loin dans la partie supérieure gauche de l'image, suivie au centre de la crête « Murray Ridge » et de la plaine sombre de « Meridiani Planum » qui se trouve dans la partie droite du panorama. Le rover qui en est déjà à sa neuvième demande de prolongation de sa mission sur la planète Mars en date du 11 avril 2014, franchit le cap de son trente-neuvième kilomètre parcouru à la surface de la planète rouge au Sol 3639 le 19 avril (Figure 133). Battant ainsi l'ancien record de distance parcourus à la surface d'un autre corps planétaire par un engin spatial construit par l'homme, qui était détenue jusqu'alors par le rover Russe Lunokhod 2 le 15 janvier 1973, qui

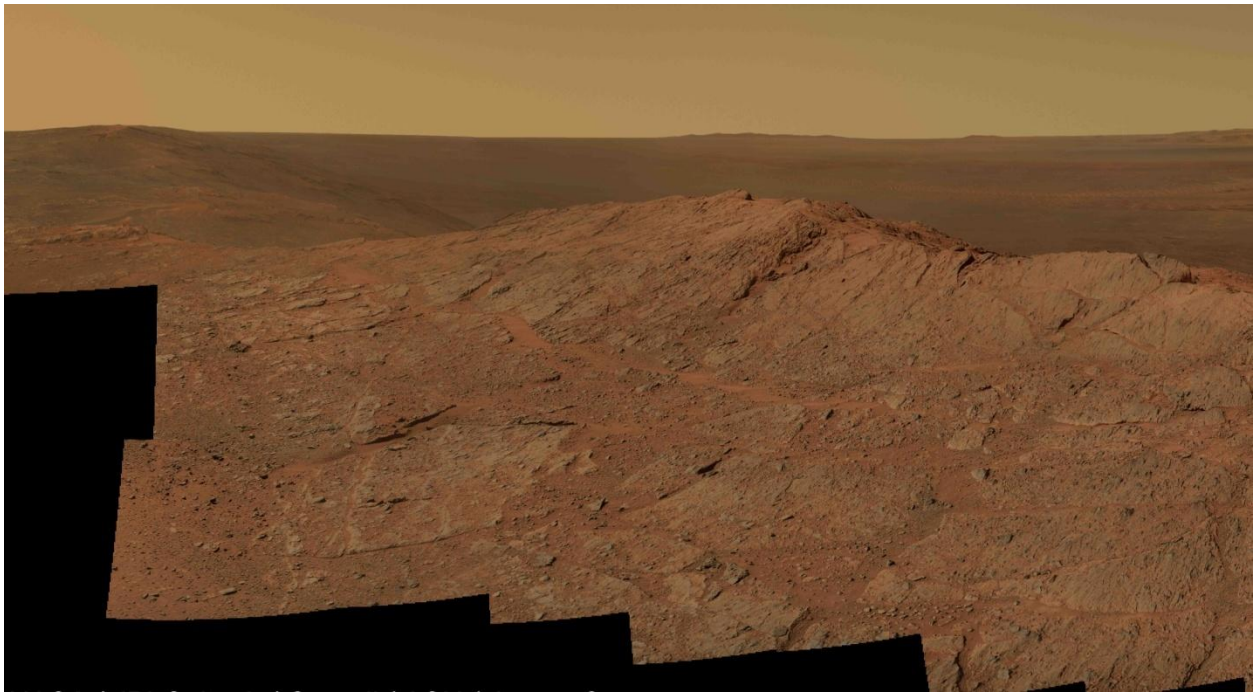


Planche 24 : Pillinger Point entre les Sols 3663-68 (Crédit : NASA/JPL-Caltech/Cornell/ASU/James Sorenson)

avait parcourus une distance de 39 km en 5 mois dans le cratère lunaire « Le Monnier ». Une certaine incertitude existant toujours sur la distance réellement parcourus par le rover Lunokhod 2, l'annonce du record fut faite trois mois plus tard au Sol 3728 le 20 juillet 2014 lors du franchissement du quarantième kilomètre d'Opportunity.

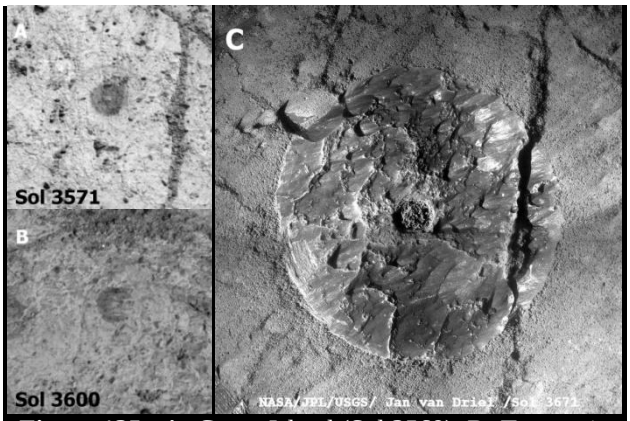


Figure 135 : A- Green Island (Sol 3569), B- Turnagain Arm (Sol 3598), C- Sarcobatus Flat (Sol 3671) (Crédit : NASA/JPL-Caltech (a-b) & Jan van Driel (c)

Opportunity parcourt un nouveau 200 mètres effectué en six séances de conduite quotidienne entre les Sols 3637 et 3644 (soit le 17, 19, 21, 22, 23 et 24 avril 2014). Le lendemain sur le Sol 3645 à la hauteur du petit cratère « Lunokhod 2 » d'environ 6 mètres de diamètre, l'astromobile éprouve de nouveau une erreur d'écriture dans sa mémoire flash. Ce qui provoque une réinitialisation à chaud de son système informatique de bord qui interrompt toutes les activités qui avaient été planifiées, et qui place le robot en mode d'attente durant deux jours, le temps de recevoir de nouvelles instructions en provenance de la Terre. Deux semaines plus tard sur le Sol 3659 le 11 mai 2014 qui marque également le 125^{e} mois de la mission d'exploration du robot sur Mars. Le rover Opportunity se positionne près du sommet de la crête « Murray Ridge », juste devant le début d'un segment d'environ 180 mètres de long ou se trouve la zone rocheuse baptisée « Pillinger Point » (Figure 134 et Planche 24). Ou la présente d'hydroxyle d'aluminium ($Al(OH)_3$) a été détecté depuis l'espace par le spectromètre d'imagerie infrarouge compacte CRISM de l'orbiteur MRO, et pouvant être la signature de montmorillonite un argile riche en aluminium. Au Sol 3662, le robot

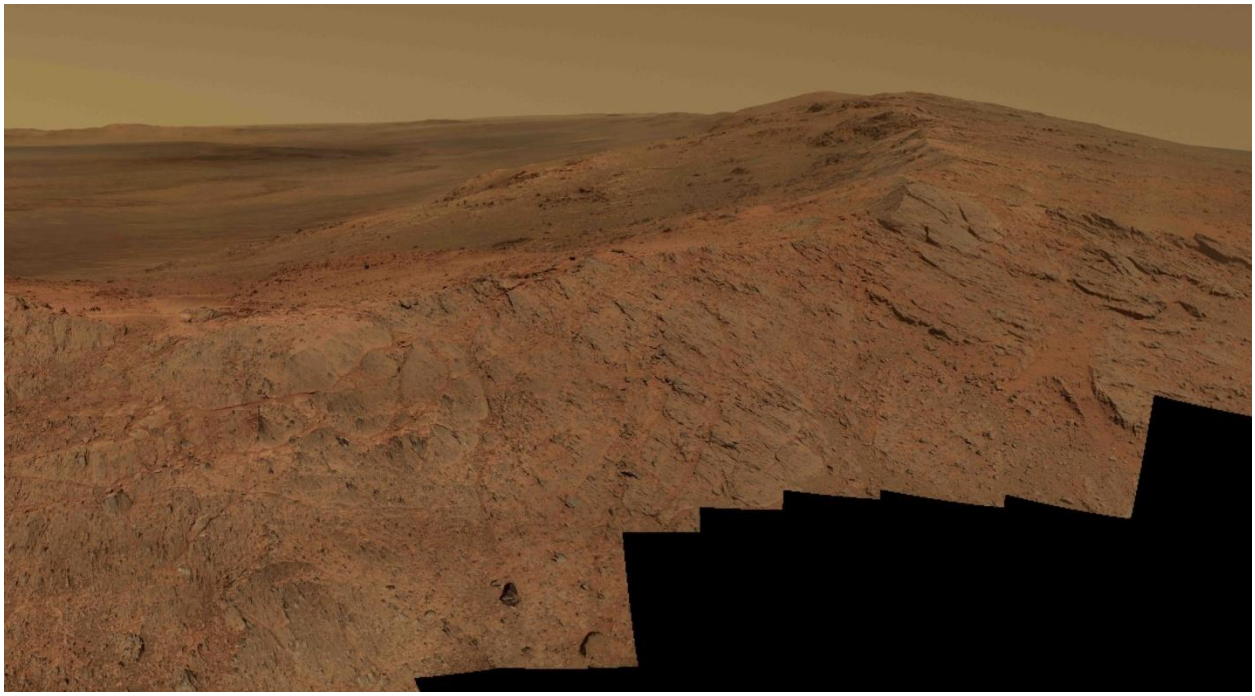


Planche 24 : Suite du panorama Pillinger Point (Crédit : NASA/JPL-Caltech/Cornell/ASU/James Sorenson)

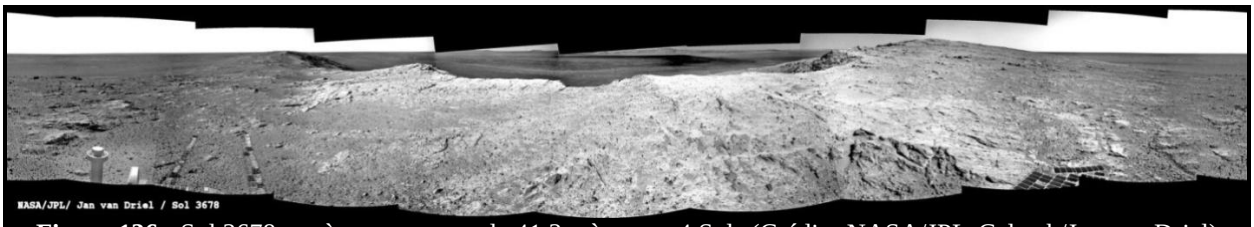


Figure 136 : Sol 3678, après un parcours de 41,3 mètres en 4 Sols (Crédit : NASA/JPL-Caltech/Jan van Driel)

Figure 137 : Sol 3684, après un parcours de 36,4 mètres en 2 Sols (Crédit : NASA/JPL-Caltech/Jan van Driel)

Figure 138 : Sol 3691, après un parcours de 41 mètres en 2 Sols (Crédit : NASA/JPL-Caltech/Jan van Driel)

Figure 139 : Sol 3701, après un parcours de 73,5 mètres en 3 Sols (Crédit : NASA/JPL-Caltech/Jan van Driel)

Figure 140 : Sol 3705, après un parcours de 10,9 mètres en 2 Sols (Crédit : NASA/JPL-Caltech/Jan van Driel)

Figure 141 : Sol 3713, après un parcours de 63 mètres en 3 Sols (Crédit : NASA/JPL-Caltech/Jan van Driel)

se déplace sur une courte distance de deux mètres, afin d'aller rejoindre la petite veine claire de sulfate de calcium dénommée « Bristol Well » pour l'étudier jusqu'au Sol 3668. La position de la veine située vers le sommet de la crête est étrange, et semble indiquer que son origine serait antérieure à la formation du cratère « Endeavour ».

Le lendemain après avoir parcours une courte distance de 2,89 mètres au Sol 3669 le 21 mai 2014, pour se positionner devant une nouvelle zone de travail. L'astromobile utilise de nouveau son outil d'abrasion RAT au Sol 3671, dans le but de nettoyer la poussière qui se trouve à la surface d'une cible qui se trouve sur le pavé d'affleurements « Sarcobatus Flat » (Figure 135:C). Le rover va par la suite étudier l'affleurement et ses environs jusqu'au Sol 3677, en utilisant les protocoles d'analyse habituel avec le spectromètre APXS et la caméra microscopique MI. Entre temps, Opportunity va subir un nouveau problème d'amnésie durant la nuit du Sol 3674, l'anormalie est survenu lorsque le robot cherchait à lire des données contenues dans un secteur corrompu de sa mémoire flash. Le rover se remet de nouveau en route vers « Cape Tribulation » au Sol 3677 (29 mai), qui se trouve à environ deux kilomètres plus au sud. Nous pouvons voir « Cape Tribulation » dans l'extrême droite des magnifiques images panoramiques des figures 136 et suivantes, qui ont été prisent par les caméras de navigations NavCam entre les Sols 3678 et 3713, et sur l'image couleur de la planche 24 prise par la caméra PanCam qui nous offre une magnifique vue donnant à l'intérieure de la cuvette du cratère « Endeavour ».

Au Sol 3680, le rover est de nouveau immobilisé par une réinitialisation à chaud, qui a été provoqué cette fois-ci par l'écriture de données dans un secteur corrompu qui se trouve dans l'une des puces de la mémoire flash. Tout juste après la récupération et la restauration du système informatique de bord de l'astromobile, une nouvelle réinitialisation à chaud est survenue au Sol 3683 le 4 juin, puis de nouveau au Sol 3686 après avoir franchis une courte distance de 19 mètres au Sol 3684 (Figure 137). Le rover reprendre de nouveau la route au Sol 3689 en parcourant 21 mètres. Ayant survécu à cinq réinitialisation à chaud en l'espace de deux mois seulement. Le rover à de nouveau un problème d'amnésie lors de son réveille au Sol 3693 (14 juin), en cherchant à lire des données situées dans un nouveau secteur corrompu de sa mémoire flash. Opportunity poursuit malgré tout son trajet le long de la crête « Murray Ridge », dont les sommets des collines forment la colonne vertébrale qui parcourt une partie de la bordure nord-

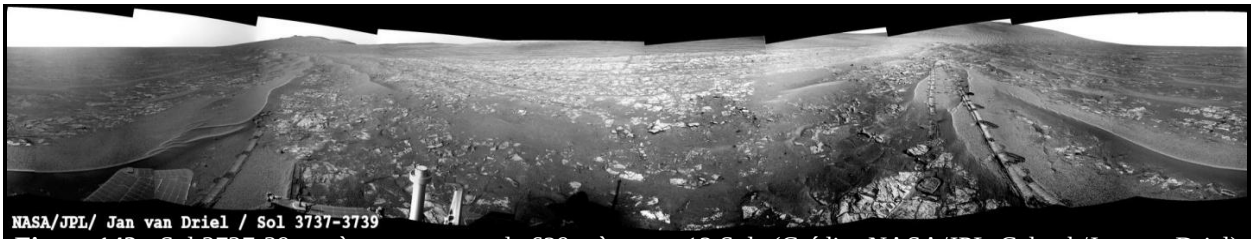


Figure 142 : Sol 3737-39, après un parcours de 629 mètres en 12 Sols (Crédit : NASA/JPL-Caltech/Jan van Driel)

Figure 143 : Wdowiak Ridge au Sol 3752-53, après avoir parcourus près de 270 mètres en 6 séances de roulement quotidien à la surface de la planète Mars (Crédit : NASA/JPL-Caltech/Jan van Driel)

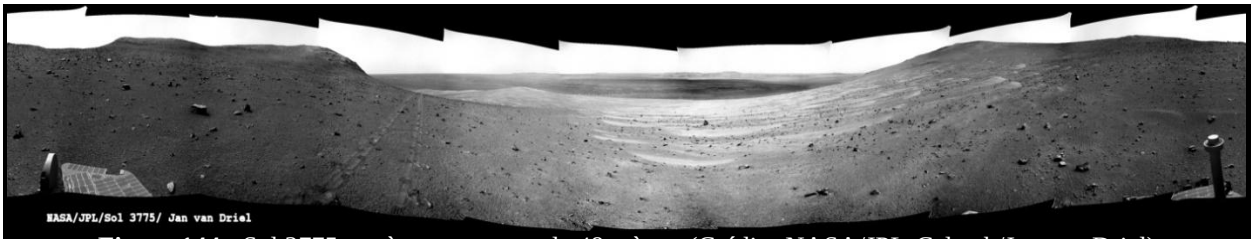


Figure 144 : Sol 3775, après un parcours de 48 mètres (Crédit : NASA/JPL-Caltech/Jan van Driel)

ouest des remparts du cratère « Endeavour ». Puis, l'astromobile s'arrête devant un site qui affleure en surface entre les Sols 3703 et 3710 baptisée « Huntingburg » (Figure 140), et qui ressemble beaucoup à une brèche d'impact composée de petites dalles de grès plates fracturées et de petits cailloux. Au Sol 3718 à la hauteur de « Broken Hills », l'astromobile arrive à la fin de la crête « Murray Ridge » et se remet en route en direction de « Cape Tribulation », ayant comme objectif futur durant sa mission sur Mars de rejoindre « Marathon Valley » qui se trouve encore à plus de deux kilomètres plus loin vers le sud. Il s'agit d'une entaille profonde d'environ 20 mètres de large qui travers de par en par la bordure ouest du cratère « Endeavour », là où la sonde MRO a détecté des niveaux très élevés de smectites de fer (nontronite) et de magnésium (saponite). La signature de trois types d'argiles différents on été détectée dans cette zone, soit deux argile à base de Fer et de Magnésium (nontronite, saponite), et une à base d'Aluminium et de Nikel (montmorillonite). Dix jours plus tard au Sol 3728 le 20 juillet 2014, le rover franchis le cap de son quarantième kilomètre parcouru à la surface de la planète Mars.

Après avoir effectué une petite manœuvre pour revenir quelque peu sur ses pas au Sol 3735, dans le but de mener à bien l'étude de plusieurs cibles de surface qui se trouve sur « Cape Fairweather » entre les Sols 3737 et 3743 (Figure 142), qui fait partie de la formation géologique « Burns » qui recouvre le plancher de « Meridiani Planum ». L'astromobile reprend la route vers le sud-est et entame l'ascension de « Cape Tribulation » cinq jours plus tard sur le Sol 3749, soit tout juste quatre jours avant l'arrivé de l'équinoxe du printemps sur Mars au Sol 3753 le 15 août (Figure 143). « Cape Tribulation » est le segment de la bordure ouest du cratère « Endeavor » qui présente des collines aux pentes plus abruptes, et ayant des sommets plus élevées culminant à une

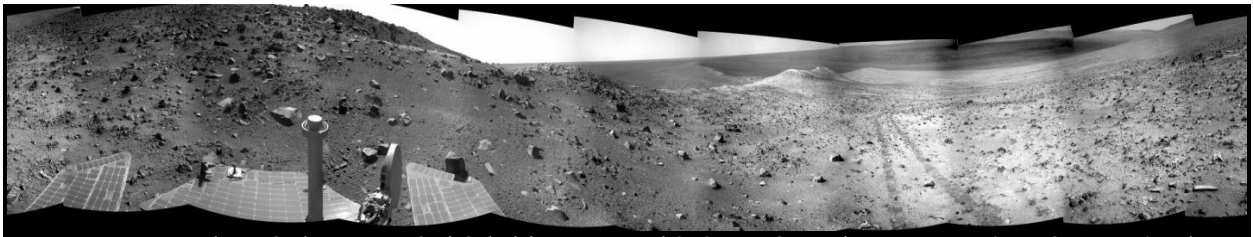


Figure 145 : Ulysse à chaque extrémité de l'image au Sol 3787, après avoir parcourus 73,5 mètres en 4 Sols (Crédit : NASA/JPL-Caltech/Iñaki Docio)

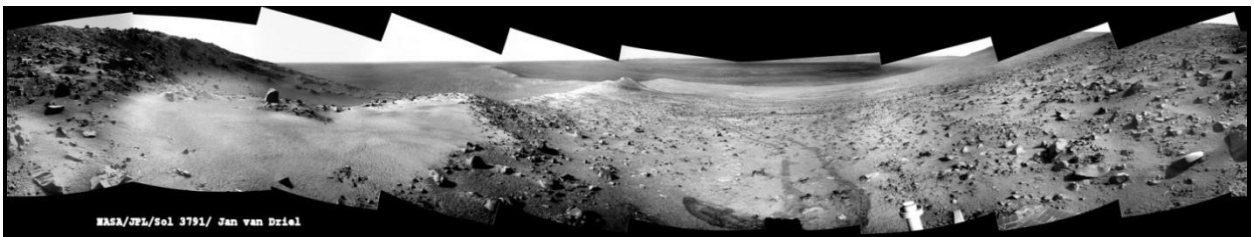


Figure 146 : Le cratère Ulysse dans la partie gauche de l'image au Sol 3791, après avoir effectué un parcours de 8,6 mètres en 2 Sols (Crédit : NASA/JPL-Caltech/Jan van Driel)

hauteur moyenne de plus de 130 mètres. Après avoir parcouru plus de 868 mètres en 32 Sols, soit depuis le Sol 3718 effectué en 15 séances de conduite quotidienne. Le rover tourne vers le sud-ouest au Sol 3751 le 11 août 2014 pour se diriger vers la pointe nord-est de la petite crête « Wdowiak Ridge » (Figure 143), qui fait une centaine de mètre de longueur et au bout de laquelle se trouve le petit cratère d'impacte « Ulysse » d'une vingtaine de mètres de diamètre entouré d'un grand nombre de blocs et de débris d'éjectas. Pour les 36 Sols suivants, Opportunity va longer tout le flanc sud-est de la crête « Wdowiak Ridge » sur un terrain glissant, rocailleux et sablonneux (Figure 144), afin de pouvoir rejoindre le petit cratère « Ulysse » qui se trouve à l'autre extrémité de la crête au Sol 3787 (Figure 145 et 146).

Durant le mois d'août 2014, il s'est produit plus d'une douzaine d'événement d'amnésie ou de réinitialisations à chaud imprévues qui ont fait planter le système informatique de bord du rover. Ces événements sont essentiellement provoqués par des événements d'écriture ou d'enregistrements de données lors de l'utilisation de secteur défectueux de la mémoire flash. Et qui surviennent le plus souvent en fin de soirée après le travail de l'APXS et avant la mise en sommeil profond, ou lors du réveil matinale du robot. Pour tenter de corriger les réinitialisations à chaud et les événements d'amnésie (perte subite de la mémoire RAM sans sauvegarde) qui se font de plus en plus fréquents. La décision fut prise de préparer le robot au processus du reformatage complète de sa mémoire flash au Sol 3762, afin d'identifier et d'isoler les blocs de mémoires flash défectueux. Il s'agissait du premier reformatage pour le robot Opportunity, et l'opération s'est terminée avec succès deux semaines plus tard sur le Sol 3776 (7 septembre) par la restauration complète du système de fichier flash, le formatage en question a été effectué au Sol 3773 le 4 septembre 2014. Mais cela n'a pas empêché la survenue de plusieurs autres événements d'amnésie durant le reste du mois de septembre, et de quatre pour le mois suivant avec un redémarrage à chaud de l'ordinateur de bord au Sol 3793 le 25 septembre 2014.

Le Sol 3790 le 22 septembre 2014 fut marqué par l'arrivé de la sonde américaine MAVEN (Mars Atmosphere and Volatile Evolution Mission), dont la mission consiste à analyser la haute atmosphère de Mars et ses interactions avec le vent solaire, dans le but de mieux

comprendre pourquoi l'atmosphère de Mars s'est échappée il y a environ 4 milliards d'années. Puis, deux jours plus tard sur le Sol 3792, c'est le tour de la sonde Indienne MOM (Mars Orbiter Mission) à se placer en orbite autour de la planète Mars. Il s'agit d'une mission de démonstration pour l'agence spatiale Indienne ISRO, et elle contient quelques instruments scientifiques qui sont orientés vers l'étude de la morphologie et de la minéralogie de la surface martienne et de la composition de son atmosphère, dont les données pourrons-êtres croisées avec ceux de l'orbiteur MAVEN de la NASA. Il y avait à cette époque sept engins spatiaux en activité dans les environs immédiats de la planète Mars, soit cinq orbiteurs (Mars Odyssey, Mars Express, MRO, MAVEN et MOM) et deux rover (Opportunity et Curiosity).

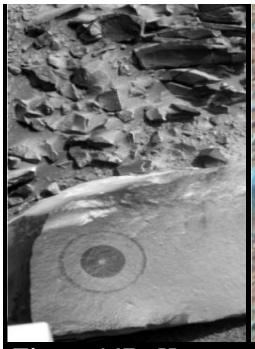


Figure 147 : Hoover

Figure 148 : Cible Margaret sur Lipscomb (Crédit : NASA/JPL/Caltech/Cornell & ASU)

Entre temps, le robot qui a rejoint la bordure sud-est du cratère « Ulysse » brosse la surface lisse de la roche baptisée « Hoover » au Sol 3795 (Figure 147), que l'on retrouve également dans la partie inférieure droite de la figure 146, juste avant la séance de brossage. Le mois d'octobre 2014 marque le 129^{iem} mois d'exploration du rover sur la planète Mars, et il est couronné par le passage de la comète « C/2013 A1 Siding Spring » qui passe au plus près de la planète Mars, et qui faisait sa première visite dans le système solaire interne depuis son départ du nuage d'Oort. Les photos de la PanCam pris sur le Sol 3817 le 19 octobre, avec des temps d'exposition allant de 10 à 50 secondes montrent une comète faiblement visible. Entre les Sols 3807 et 3813, le robot Opportunity qui a trouvée une autre roche qui présente des caractéristiques quelques peu différentes de celles qui ont été rencontré jusqu'à présent. Entame une nouvelle séance de brossage avec son outil d'abrasion RAT sur la cible baptisée « Margaret » au Sol 3812, qui se trouve sur la surface lisse de la roche dénommé « Lipscomb » (Figure 148), et que l'on peut également voir dans la partie inférieur droite de la figure 146 juste à droite des empruntes de roue du rover, et dont la partie gauche de l'image nous offres une magnifique vue plongeante dans le cratère « Ulysse ». Une tempête régionale de poussières s'est levée à l'ouest du cratère « Endeavour », faisant monter le facteur Tau à des valeurs supérieur à 1,7 à partir du Sol 3817 (20 octobre), obligeant le rover à chercher un endroit plus sécuritaire où l'inclinaison est plus favorable à la production d'énergie entre les Sols 3821 et 3825, jusqu'au moment ou le facteur Tau c'est remis à redescendre de manière significative.

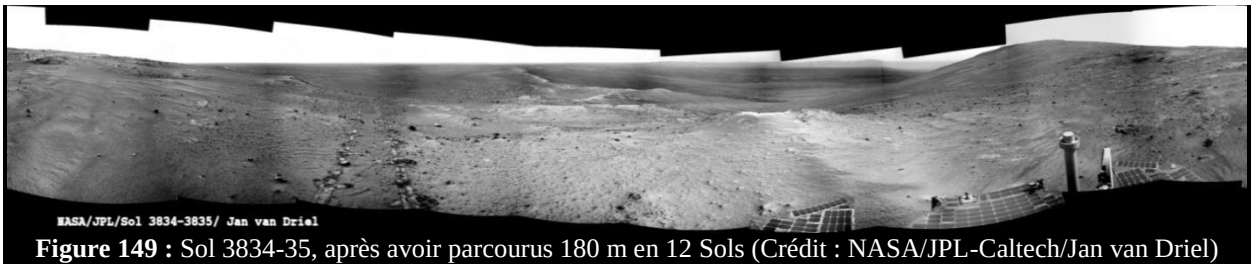


Figure 149 : Sol 3834-35, après avoir parcourus 180 m en 12 Sols (Crédit : NASA/JPL-Caltech/Jan van Driel)

Une semaine plus tard sur le Sol 3832 (3 novembre), après avoir terminé l'étude du champ d'éjectas d'origine basaltique et parcouru une distance de 32 mètres. L'astromobile quitte

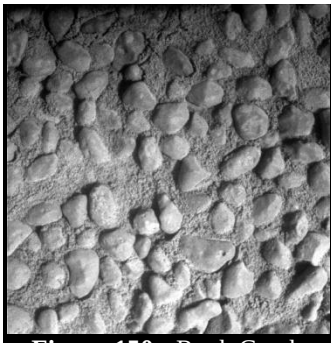


Figure 150 : Rock Creek (Crédit : NASA/JPL/Caltech)

définitivement le domaine du cratère « Ulysse » en se dirigeant vers le sud, afin de poursuivre l'ascension des pentes qui conduit vers le sommet de « Cape Tribulation » et par la suite vers « Marathon Valley » qui se trouve un peu plus loin (Figure 149). Le magnifique paysage que dévoile le panorama de la figure 149 pris au Sol 3834 et 3835 par les caméras de navigation. Nous montre une vue en hauteur plongeant sur le parcours du rover Opportunity le long des remparts de la crête nord-ouest du cratère « Endeavour », soit le trajet qui va de « Solander Point » jusqu'au petit cratère « Odyssey ». Sur l'image en partant de la gauche en allant vers la droite, on peu distinguer le petit cratère « Ulysse » suivit à sa gauche de la petite crête « Wdowiak Ridge », qui surplombent les pleines plus sombres de « Meridiani Planum » qui viennent s'appuyer doucement contre les contreforts de la bordure nord-ouest des remparts du cratère « Endeavour ». Et dans la partie centrale du panorama nous retrouvons les différents segments parcourus par l'astromobile avec en arrière plan le plancher de la cuvette du cratère avec une profondeur moyenne de plus de 300 mètres. Et à droite de l'image nous retrouvons le sommet de « Cape Tribulation » qui culmine à plus de 135 mètres de hauteur sur les plaines environnante. Après avoir étudié la cible « Rock Creek » qui ressemble à un petit amas de gravier au Sol 3836 le 8 novembre 2014 (Figure 150). Opportunity reprend la route vers le sud et franchis le cap de son 41^{iem} kilomètres parcouru à la surface de la planète Mars au Sol 3837. Deux jours plus tard sur le Sol 3839, le robot parcours pour la première fois depuis presque quatre mois, soit depuis le Sol 3728 le 10 juillet 2014, une distance de roulement quotidienne supérieur aux 100 mètres en ajoutant au compteur plus de 100,3 mètres.

Figure 151 : Sol 3846, après avoir parcourus 350 mètres en 6 Sols (Crédit : NASA/JPL-Caltech/Damia Bouic)

En progressant sur le terrain en direction du sommet de « Cape Tribulation » au Sol 3846, le rover a croisé sur sa route un vaste réseau de fractures que l'on peut voir dans la partie gauche de la figure 151. L'astromobile va faire une longue pause entre les Sols 3846 et 3862 du 18 novembre au 4 décembre 2014, afin d'examiner plus en détail le socle rocheux de la plus grande des fractures. Cette longue campagne d'étude de terrain commance par l'analyse de la petite veine de sulfate de calcium baptisée « Cottondale » entre les Sols 3850 et 3868, suivit d'une séance de brossage avec l'utilisation de la RAT sur les cibles « Calera » au Sol 3850 (23 novembre) et « Locust Fort » au Sol 3854 (27 novembre) pour nettoyer quelque peut la poussière à leur surface. Entre temps, les problèmes de la mémoire flash rencontré pour la première fois sur le Sol 3082 le 24 septembre 2012, resurgissent de nouveau au Sol 3850 avec trois erreurs d'écriture et deux événements d'amnésie qui surviennent de manière consécutifs. Le robot Opportunity aura parcourus une distance de plus de 457 mètres durant tout le mois de novembre 2014, et après un nouveau reformatage effectué sur le Sol 3862 le 4 décembre 2014. Le rover connaît de nouveau des problèmes avec sa mémoire flash avec une série de réinitialisation au Sol 3864 et 3865. La décision fut donc prise de faire fonctionner le robot sans l'utilisation de la

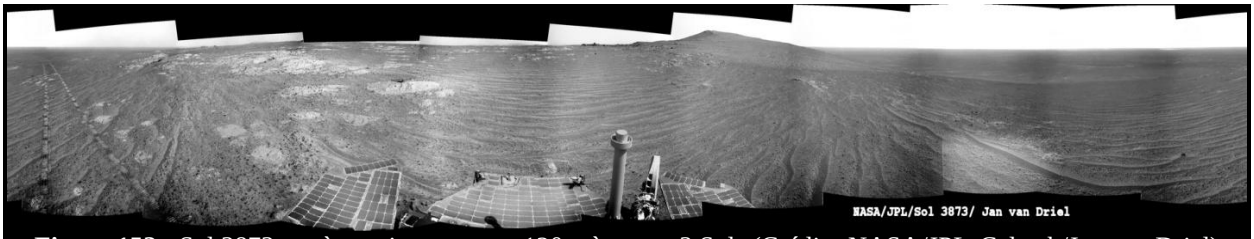


Figure 152 : Sol 3873, après avoir parcourus 120 mètres en 3 Sols (Crédit : NASA/JPL-Caltech/Jan van Driel)

Figure 153 : Sol 3881-84, à cent mètres du sommet (Crédit : NASA/JPL-Caltech/Jan van Driel)

mémoire flash, en s'appuyant uniquement sur l'utilisation de la mémoire vive RAM. Dans ses conditions, les données acquissent durant le jour doivent impérativement êtres transférer vers la terre avant la mise hors tension quand le robot est mis en sommeil, car ce mode de fonctionnement (dégradé) ne permet pas de conserver les données lorsque l'alimentation du robot est coupée durant la nuit. Pour remédier aux problèmes de la mémoire flash, et puisque que tout les accidents ont eu lieu dans le même secteur de mémoire défectueuse. La décision fut prise de préparer une mise à niveau de la version R9.3 du logiciel de bord d'Opportunity, qui occupe le huitième et dernier secteur de mémoire flash, afin d'isoler et de masquer définitivement le secteur défectueux sur les sept qui compose les circuits électronique alloué à la mémoire de stockage du rover. Au Sol 3881 le 24 décembre 2014, l'astromobile n'était plus qu'à cent mètres du sommet de « Cape Tibulation » (Figure 153).

Figure 154 : Sol 3894, Sommet de Cape Tribulation (Crédit : NASA/JPL/Cornell/Marco Di Lorenzo & K. Kremer)

Figure 155 : Sol 3909-3910, après un parcours d'environ 95 mètres en 4 séances de conduite depuis le sommet (Crédit : NASA/JPL-Caltech/Jan van Driel)

Durant toute l'année 2014, l'astromobile aura parcourus une distance de plus de 2 837,34 mètres en longeant les différents segments de la ligne de crête nord-ouest des remparts du cratère

« Endeavour ». Le rover Opportunity atteint finalement le sommet le plus haut de « Cape Tribulation », culminant à plus de 135 mètres d'altitude au-dessus des plaines de « Meridiani Planum » au Sol 3894 le 6 janvier 2015 (Figure 154). Après l'étude de la roche « Gertrude Bell » entre les Sols 3897 et 3901, que nous pouvons voir au centre de la figure 154 juste à gauche des panneaux solaires du robot. Le rover reprend la route vers sa prochaine destination au Sol 3902 le 14 janvier 2015, en se déplaçant vers le sud-est en direction du petit cratère d'impact peu profond d'une trentaine de mètres de diamètre baptisée « Spirit of St. Louis », et qui se trouve 600 mètres plus loin vers le sud située tout juste à l'entrée de « Marathon Vallée ». Après avoir parcourus plus de 228 mètres en cinq séances de conduite quotidienne, l'astromobile rejoint la zone de travail « James Grizzly Adams » au Sol 3911. Opportunity fête également son onzième anniversaire à la surface de la planète Mars au Sol 3911 le 24 janvier 2015, soit une durée de mission qui est 44 fois plus longue que les trois mois qui avait été initialement prévus.

MARATHON VALLEY
(Sol 3912 à 4485)

Après l'étude de la zone de travail qui se trouve près de « James Grizzly Adams » entre les Sols 3911 et 3913, Opportunity reprend la route vers le sud en direction de « Marathon Vallée » sur le Sol 3914 le 28 janvier 2015. Après avoir franchis une distance de 317,7 mètres au mois de janvier 2015 depuis le départ du sommet de « Cape Tribulation » (Figure 154 et 157), l'astromobile franchis le cap de son 42ème kilomètre parcourus à la surface de la planète Mars au Sol 3926 le 8 février. Le rover se déplacement ensuite sur une courte distance vers l'Est, et amorce l'étude de la roche « Jean Baptiste Charbonneau » et ses environs entre les Sols 3930 et 3935 (Figure 158, en haut à droite). Il s'agit d'un nouveau type de roche riche en aluminium et en silicium qui a été rencontré pour la première fois au Sol 3897, et qui fait partie des « Shatters Cones » ou cône de percussion. Ce sont des roches qui présentent à leur surface une structure striée constituée de réseau de fractures coniques emboîtées. Ce type de roche se forme généralement par le passage d'une onde de choque de très haute pression qui survient lors d'une collision très violente de météorite ou de petit astéroïde, dont certaine peuvent êtres éjecter hors du cratère ou elles ce sont formées pour prendre l'aspect de brèche d'impacte.

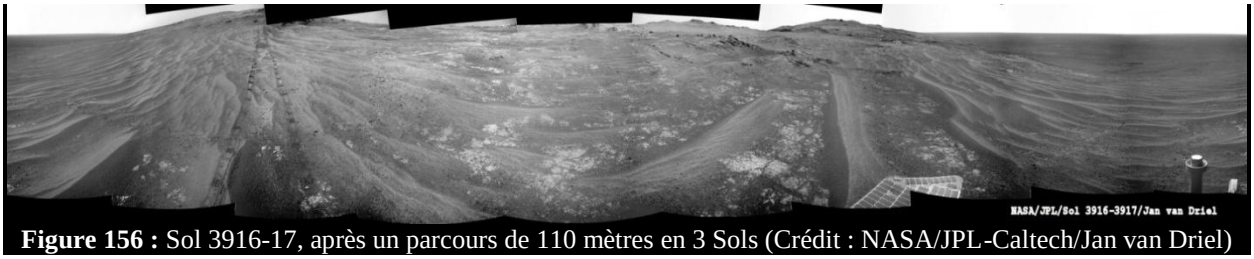


Figure 156 : Sol 3916-17, après un parcours de 110 mètres en 3 Sols (Crédit : NASA/JPL-Caltech/Jan van Driel)

Figure 157 : Sol 3919-20, après un parcours d'environ 24 mètres (Crédit : NASA/JPL-Caltech/Jan van Driel)

Figure 158 : Sol 3931, après un parcours de 88,7 mètres en 4 Sols (Crédit : NASA/JPL-Caltech/Jan van Driel)

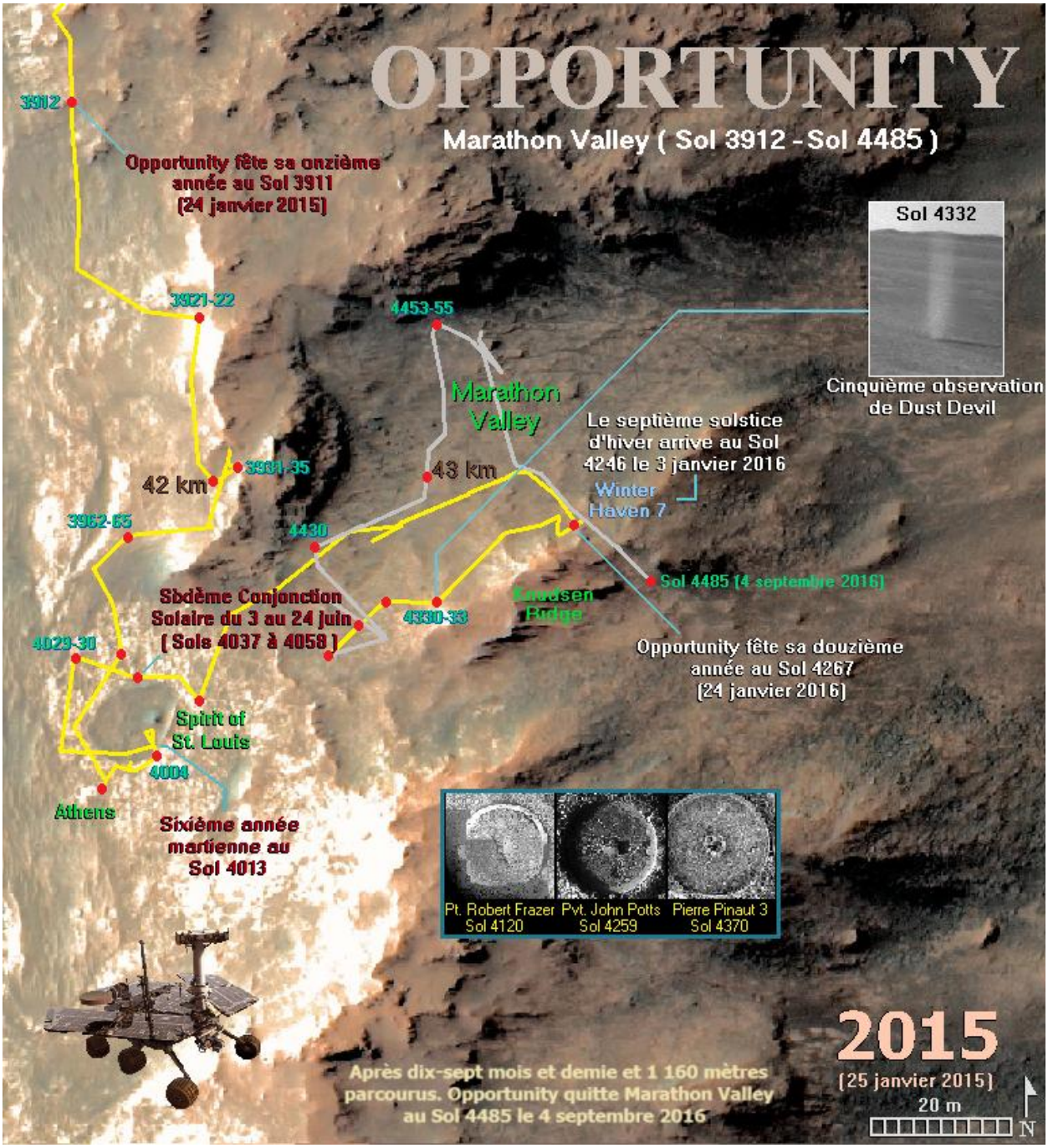


Planche 25 : Parcours d'Opportunity entre les Sols 3912 et 4485 La photo d'arrière-plan a été obtenue grâce aux données fournies par la caméra HiRISE et le spectromètre d'imagerie infrarouge compacte CRISM de Mars Reconnaissance Orbiteur (MRO). Position et trajet du rover guidés par les cartes de Phil Stooke.

Au Sol 3934 le 16 février, une petite rafale de vent est venue nettoyer la poussière sur les panneaux solaires du rover, faisant augmenter sa puissance électrique de 12 %. La nouvelle version R9.4 du logiciel de bord est finalement télécharger une semaine plus tard le 24 février au Sol 3942 (Figure 159), et le système s'est réamorcé correctement dès le lendemain. Plusieurs tests seront effectués en utilisant le mode de fonctionnement de la mémoire volatile RAM, avant de reformater complètement la mémoire flash et de permette au système informatique de gérer la

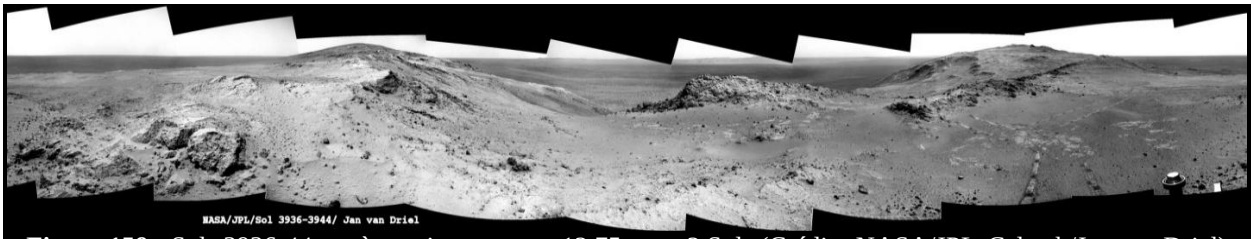


Figure 159 : Sols 3936-44, après avoir parcourus 12,75 m en 2 Sols (Crédit : NASA/JPL-Caltech/Jan van Driel)

Figure 160 : Sols 3946-47, après avoir parcourus 34 mètres en 2 Sols (Crédit : NASA/JPL-Caltech/Jan van Driel)

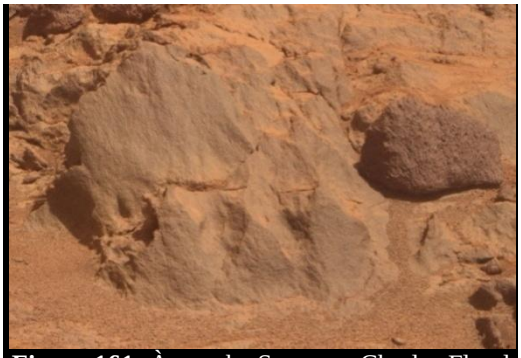


Figure 161: À gauche Sergeant Charles Floyd et à droite la roche Sergeant Nathaniel Prior (Crédit : NASA/JPL/Cornell U./James Canvin)

mémoire avec la prise en charge de l'isolement du secteur défectueux. Le mois de février s'est terminé avec une distance parcourus de 106,51 mètres supplémentaire au compteur. L'astromobile se déplace ensuite sur une courte distance de 30 mètres vers le sud (Figure 160 et 161), pour mener une nouvelle campagne d'étude sur des roches présentant une faible teinte bleuâtre et violacé sur des images en fausses couleurs prises par le robot. La première cible à être analysée est « Sergeant Charles Floyd », qui présente une faible teinte bleuâtre entre les Sols 3948 et 3954, avec en prime l'utilisation de la RAT au Sol 3950 pour enlever la poussière qui recouvre sa surface. La deuxième cible est la petite roche ovale baptisée « Sergeant Nathaniel Prior » qui à une teinte plus violacé entre les Sols 3955 et 3961. Opportunity reprend la route vers l'ouest au Sol 3962 (Figure 162), pour se diriger vers le petit cratère ovale peu profond « Spirit of St. Louis » qui est situé devant l'entrée de « Marathon Valley ». En cours de route entre les Sols 3963 et 3965, le rover fait une pause de quelques jours le temps de préparer le système informatique de bord pour le reformatage complet de la mémoire flash, qui est inutilisée depuis le 7 décembre 2014 (Sol 3865). Le système de fichier électronique de la mémoire flash est reformaté avec succès sur le Sol 3964 le 19 mars 2015 à 01h30 du matin, heure locale de Mars, et Opportunity peut utiliser de nouveau les capacités de stockage de sa mémoire flash.

Deux jours plus tard sur le Sol 3966, le robot parcours une distance de 54 mètres pour rejoindre la crête nord du petit cratère « Spirit of St. Louis », dont la région centrale est occupée par une dépression orienté vers l'Est suivit d'un petit monticule surmonté d'une pile de roche sombres bizarre baptisée « Lindbergh Mound ». Mais cinq jours après avoir reformaté le système de fichier électronique de la mémoire flash, au moment ou le rover contournait par le nord-ouest le petit cratère « Spirit of St. Louis » pour se dirigé vers l'affleurement rocheux de teinte claire « Athens ». L'astromobile éprouve de nouveau un événement d'amnésie simple juste avant sa mise en vielle pour passer la nuit au Sol 3968 (24 mars). Cet événement d'amnésie n'a pas été

Figure 162 : Sols 3962-63, après avoir parcourus 36 mètres en 2 Sols (Crédit : NASA/JPL-Caltech/Jan van Driel)

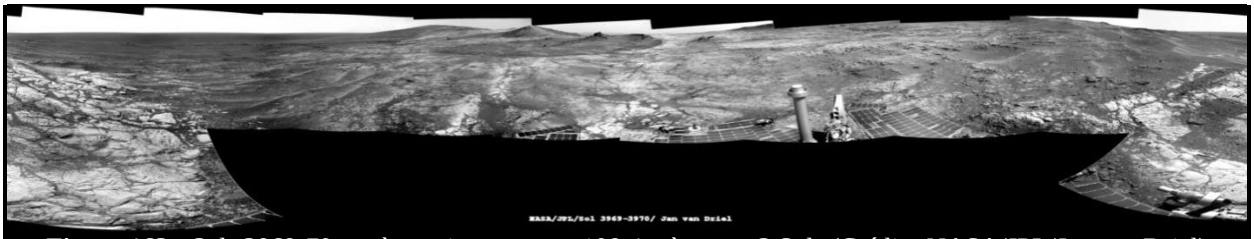


Figure 163 : Sols 3969-70, après avoir parcourus 109,4 mètres en 3 Sols (Crédit : NASA/JPL/Jan van Driel)

suivit de la réinitialisation complète du système informatique de bord du rover, comme cela ce produisait antérieurement avant la mise à niveau des logiciels et du reformatage de la mémoire flash. Les données recueillies la vieille ont donc été préservé, car elles ont été récupérées dans la mémoire de chaque instrument, contrairement à la situation ou une faute grave provoque la réinitialisation du système informatique de bord avec perte des données. Opportunity est entré dans l'histoire durant la nuit du 23 au 24 mars 2015 sur le Sol 3968 en dépassant la distance d'un marathon (42,195 kilomètres). Sur le Sol suivant, l'astromobile parcourt une courte distance de 5,5 mètres vers le sud-est pour se positionner devant l'affleurement rocheux de teinte claire « Athens », dans le but d'amorcer une vaste campagne d'étude des environs durant quatre semaines entre les Sols 3969 et 3997 (Figure 163). Le petit cratère « Spirit of St. Louis » d'environ 34 mètres de long sur 24 mètres de large est visible dans la partie centrale des figures 163 et 164, ainsi que le petit amas de pierre de 2 à 3 mètres de haut dénommé « Lindbergh Mound ». Malgré le reformatage de la mémoire flash avec la prise en charge du secteur 7 défectueux, un deuxième événement d'amnésie est survenu au Sol 3969. Le robot utilise son outil d'abrasion RAT le lendemain sur le Sol 3970, pour polir et nettoyer la surface d'une cible qui se trouve sur l'une des dalles de pierre de couleur clair de l'affleurement « Athens » (Figure 170:A).

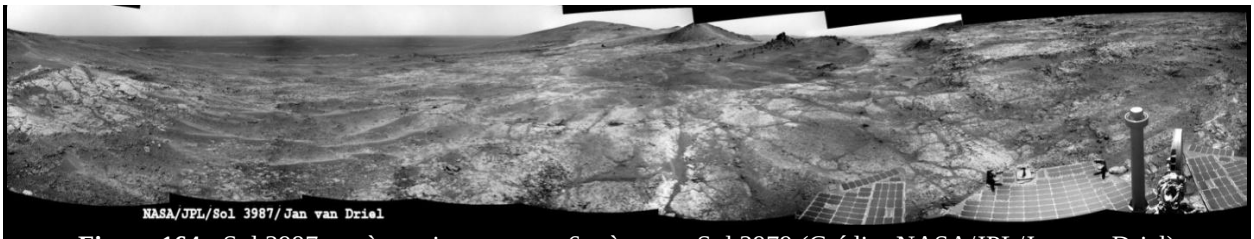


Figure 164 : Sol 3987, après avoir parcourus 6 mètres au Sol 3979 (Crédit : NASA/JPL/Jan van Driel)

Le robot étudie plusieurs pavés d'affleurements rocheux de teinte claire qui présente à leur surface des cibles d'intérêts géologique, dont « Thessaloniki » et « Thermopylae » que l'astromobile va analyser jusqu'au Sol 3997. L'astromobile utilise de nouveau son outil d'abrasion RAT pour polir et nettoyer la surface d'une cible qui se trouve sur le pavé d'affleurement « Thessaloniki » au Sol 3975 (Figure 170:B). Deux autres épisodes d'événements d'amnésie sans perte de données scientifiques vont survenir dans la soirée des Sols 3979 et 3980

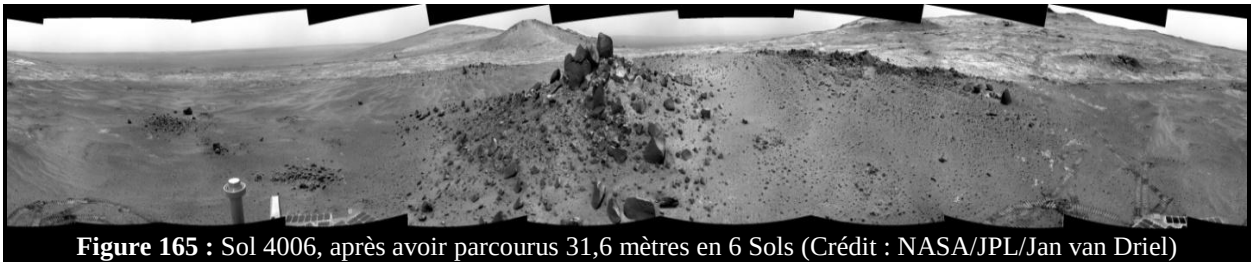


Figure 165 : Sol 4006, après avoir parcourus 31,6 mètres en 6 Sols (Crédit : NASA/JPL/Jan van Driel)

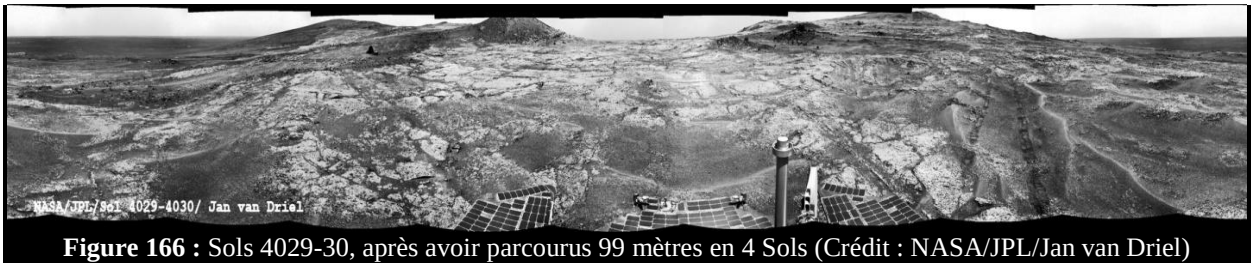


Figure 166 : Sols 4029-30, après avoir parcourus 99 mètres en 4 Sols (Crédit : NASA/JPL/Jan van Driel)

Figure 167 : Lindbergh Mound, photo prise au Sol 4011 (Crédit : NASA/JPL-Caltech/Elisabetta Bonora)

(3 et 5 avril 2015), et qui ont été suivit une semaine plus tard par deux autres événements d'amnésie sans conséquence grave dans la soirée des Sols 3987 et 3988 le 12 et le 13 avril (Figure 164). Six jours plus tard durant l'après-midi du Sol 3994, Opportunity subit un premier redémarrage soudaine et imprévue suivit d'une réinitialisation à chaud de son système informatique de bord depuis le reformatage de la mémoire flash, effectué un mois plus tôt sur le Sol 3964 le 19 mars 2015. L'événement s'est produit lors de la préparation du relais de communication pour le transfère des données entre l'antenne UHF de l'astromobile et l'orbiteur Mars Odyssey, suivit le soir même d'un nouvel événement d'amnésie qui est survenue juste avant la mise en sommeil profond du rover (mode Deep Sleep). Les procédures de restauration de l'ordinateur de bord sont finalement complétées sur le Sol 3996. Et deux jours plus tard au Sol 3998, l'astromobile parcourt une courte distance de huit mètres vers le nord-est pour rejoindre le rebord sud du cratère « Spirit of St. Louis », et s'arrête près du petit monticule de roche dénommé « Lambert Field ». Durant ce temps, la levée de tempêtes de poussières régionales ont fait grimper le facteur Tau de l'opacité atmosphérique, passant de 0,766 au Sol 3998 le 22 avril à plus de 1,395 au Sol 4003 le 28 avril, faisant passer le bilan d'énergie de 620 watts/heures à moins de 526 watts/heures, soit une chute de 15,16%.

Le Sol 4002 (27 avril) et le Sol 4004 (29 avril), ont tout les deux été marqués par de nouveaux événements d'amnésie sans conséquence grave. Durant le mois d'avril, il y a donc eut un total six événements d'amnésie bénins et un réamorçage à chaud. Entre les Sols 4004 et 4029, Opportunity va explorer l'intérieur du cratère « Spirit of St. Louis » durant presque quatre semaines, en commençant par l'amas de pierre « Lindbergh Mound » (Figure 167) et la roche « Roosevelt Field » entre les Sols 4005 et 4010 (Figure 165). Puis s'est le tour de la roche « Harry H Knight » et de l'affleurement « Harold M Bixby » entre les Sols 4011 et 4015, ou entre temps le rebot a fêté sa sixième année martienne au Sol 4013. L'étude se poursuit sur un terrain bosselé dénommée « Donald A Hall », qui se trouve neuf mètres plus loin vers l'ouest entre les

Figure 168 : Sols 4032-36, après avoir parcourus 19 mètres (Crédit : NASA/JPL/Jan van Driel)

Figure 169 : Sols 4086-87, après avoir parcourus 112,67 mètres en 5 Sols (Crédit : NASA/JPL/Jan van Driel)

Sols 4020 et 4029, incluant une petite séance de brossage avec la RAT pour dépoussiérer et nettoyer une cible de surface qui se trouve sur la roche au Sol 4023 le 19 mai 2015. Le rebot sort définitivement du cratère « Spirit of St. Louis » au Sol 4029 en parcourant une courte distance de 34 mètres vers le nord, et commence à le contourner par le nord-ouest dans le sens des aiguilles d'une montre (Figure 166), afin de se dirigé vers les filons de matériaux argileux détecté depuis l'espace qui se trouve un peu plus loin vers l'Est dans « Marathon Valley ». Mais avant d'aller plus loin, l'astromobile doit se préparer à passer la longue période de silence radio qui aura lieu lors de la sixième conjonction solaire entre les Sols 4037 et 4058, soit du 3 au 24 juin 2015. Opportunity va se positionner dans la région nord du cratère près de la cible de roche dénommée « William Bratton » au Sol 4031 (Figure 168), et se prépare pour faire des analyses sur la composition chimique de la roche et prendre des mesures de l'argon atmosphérique en mode de pilotage automatique. Au cours du mois de mai, il y a eu trois nouveaux événements d'amnésie bénins (Sols 4021, 4023 et 4024) et quatre réinitialisations à chaud (Sols 4017, 4023, 4024 et 4026). Pour plus de sécurité, l'accès à la mémoire flash sera déconnecté à partir du Sol 4027 pour toute la durée de la conjonction solaire, ne laissant accessible que la mémoire RAM volatile en mode persistant. Les données recueillies seront transférées quotidiennement vers les sondes orbitales Mars Odyssey et MRO, pour y êtres stockées en mémoire avant d'êtres transférées plus tard vers la terre après la conjonction solaire. Après trois semaines de silence radio, Opportunity reprend finalement contact avec la Terre le 24 juin au Sol 4058. Le rebot est sortie saint et sauf de la sixième conjonction solaire, et les roches étudiées jusqu'ici sont tous des brèches d'impactes formées de fragments brisés dont la composition est enrichit en silicium, aluminium avec un peu de chlore et de soufre.

Le rover est toujours en mode de fonctionnement RAM, et la mémoire flash ne sera pas activée avant d'avoir mieux compris ce qui ne va pas avec la mémoire électronique non volatile. Deux semaines après avoir brossé et étudié la surface de l'affleurement « Ryan NYP » (Sol 4064), qui se trouve dans la zone en bordure du cratère et qui présente une teinte rougeâtre. Opportunity reprend la route vers l'Est au Sol 4077 (13 juillet), et après avoir contourné le cratère « Spirit of St. Louis » par le nord-est. L'astromobile s'aventure encore plus profondément dans « Marathon Valley » dès le lendemain, en longeant le flanc sud-est des parois des falaises situées au nord de la vallée. Dans un premier temps, Opportunity doit mener une campagne de

reconnaissance du terrain en faisant le tour complet de « Marathon Valley », qui s'étant sur plus de 330 mètres de long avec une largeur moyenne de 50 mètres. Cette campagne de reconnaissance à pour objectif de repérer les meilleurs sites pour préparer le rebot à passer son septième hiver martien (Winter Haven 7), dont le solstice est prévu pour le 3 janvier 2016. Le septième hiver sera plus difficile à passer que les autres sans l'utilisation de la mémoire flash, et il faut s'attendre à une détérioration des pièces électronique qui sera encore plus accrue aux cours des prochains cycles thermiques diurne et nocturne hivernaux. La mémoire flash est réactivée entre les Sols 4081 et 4084 lors de l'approche du pavé d'affleurement « Pvt. Reubin Field » (Sols 4084-4095), dans le but de vérifier son comportement depuis la conjonction solaire. Mais au Sol 4085 (21 juillet 2015) est survenu un nouveau redémarrage à chaud avec perte de données, obligeant ainsi le rover à revenir en mode de fonctionnement utilisant la mémoire RAM volatile persistante dès le lendemain sur le Sol 4086 (Figure 169).

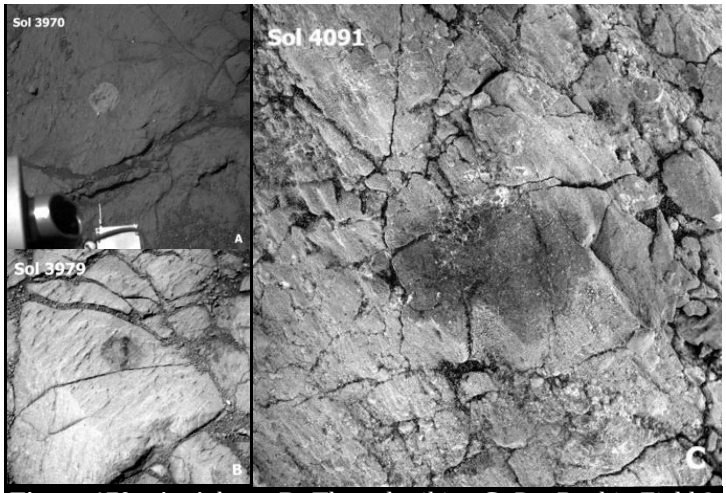


Figure 170 : A- Athens, B- Thessaloniki et C- Pvt Reubin Field 2 (Crédit : NASA/JPL-Caltech (a-b) & James Canvin (c))

Figure 171 : Site de Pvt. Robert Frazer avant et après les brossages aux Sols 4107, 4110 et 4112, et 4120 (Crédit : NASA/JPL-Caltech/Elisabetta Bonora & Marco Faccin)

Après l'étude et le brossage de la cible de roche « Pvt Reubin Field2 » sur le Sol 4091 le 28 juillet (Figure 170:C). L'astromobile poursuit sa route vers l'Est au Sol 4096 et rejoint le site de travail situé près de l'affleurement « Pvt. George Gibson » entre les Sols 4098 et 4125. La campagne d'étude inclut le polissage et le brossage de la cible « Pvt. Robert Frazer3 » au Sol 4107 et de « Pvt. Robert Frazer6 » au Sol 4120 pour retirer la couche superficielle, suivit de deux séances de broyage pour creuser plus profond dans la cible de roche « Pvt. Robert Frazer3 » aux Sols 4111 et 4114 (Figure 171). Il s'agit de la première utilisation de l'outil d'abrasion RAT pour creusée plus profondément dans une roche depuis plus de deux ans, soit juste avant l'arriver du rover à « Solander Point » lors du brossage et du creusage de la roche « Black Shoulder » exécutée au Sol 3382 le 29 juillet 2013. Opportunity reprend la route en parcourant une courte distance de 14 mètres vers l'ouest au Sol 4125, et entame l'étude de trois cibles de surface de teinte rouge foncée sur la roche « Pvt. Silias Goodrich » entre les Sols 4125 et 4138, et étudie de nouveau le pavé d'affleurement « Pvt. Robert Frazer » entre les Sols 4139 et 4145. L'astromobile est très mal situé sur le terrain se trouvant en ligne de visée avec les parois hautes de la crête nord

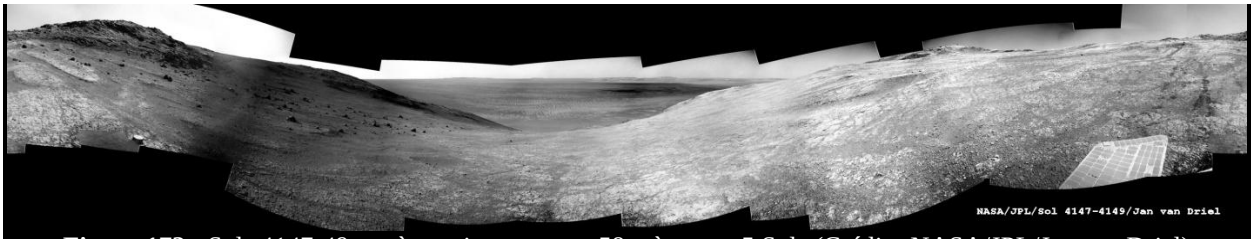


Figure 172 : Sols 4147-49, après avoir parcourus 58 mètres en 5 Sols (Crédit : NASA/JPL/Jan van Driel)

de « Marathon Valley » et le soleil en fin de journée, et qui commence à faire obstruction dans les relais de communication UHF entre Opportunity et les orbiteurs qui survole la région sur des orbites basse donnant vers l'ouest. Le robot va donc commencer à se déplacer tranquillement vers le nord-est à partir du Sol 4145 (21 septembre), tout en poursuivant la descente des pentes pour s'aventurer encore plus profondément dans « Marathon Valley » à travers sa quête de matériaux argileux (Figure 172). À partir du Sol 4146, le rebot a débuté une longue séance de test pour vérifier la mémoire flash échalonnées sur une durée de neuf jours. Durant cet interval de temps, le rover à subit deux événements d'amnésies (Sols 4146 et 4153) et trois nouveaux redémarrages imprévus avec perte de données, soit deux événements survenus au Sol 4149 et un événement au Sol 4154. Après cet ensemble d'accident, le mode de fonctionnement utilisant la mémoire RAM fut réactivée dès le début du mois d'octobre sur le Sol 4155, il s'agit alors du 130ème mois d'exploration sur la planète Mars pour le rover Opportunity. Deux jours plus tard sur le Sol 4157 le 3 octobre 2015, le robot change de direction pour se diriger vers le sud-est dans le but d'aller rejoindre un emplacement qui se trouve à la base du versant sud de « Marathon Valley ».

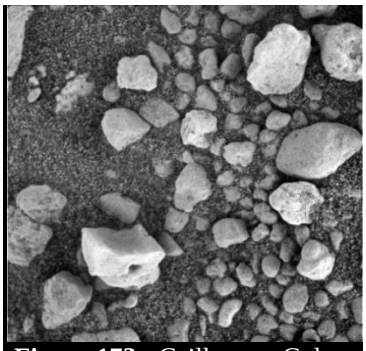


Figure 173 : Cailloux et Galets (Crédit : NASA/JPL-Caltech)

L'inclinaison des pentes se trouvant à cet endroit est plus favorable pour donner une meilleure orientation des panneaux solaires vers le nord en direction du soleil. Et ceci, afin de bénéficier d'un maximum d'ensoleillement pour optimiser la récupération et la production d'énergie pour la recharge des batteries, et de permettre au rover de passer à travers le septième hiver martien tout en ayant la possibilité d'être mobile et de mener à bien des petites campagnes d'étude sur le terrain. De plus, le site sélectionné pour le septième refuge d'hiver regroupe différentes zones de roche de teinte rouge foncée composé d'hématite riche en aluminium et en silicium, mais pauvre en fer et en manganèse, pouvant être la signature de minéraux phyllosilicaté ou d'argile de type smectite. Après avoir effectué un parcours de 58 mètres en sept séances de roulement depuis le Sol 4152. Le robot qui se trouve sur une pente inclinée de 12 degrés, s'arrête durant plus d'un mois entre les Sols 4166 et 4199 du 14 octobre au 16 novembre 2015, le temps de faire des testes d'ingénierie sur la défaillance de la mémoire flash, et pour faire l'étude d'une zone d'échantillonnage qui regroupe plusieurs cibles de roches intéressantes (Figure 173). Le mois de novembre 2015 sera un autre mois difficile pour le rover, ayant subit plusieurs événement d'amnésie et deux autres redémarrages imprévus aux Sols 4189 et 4196. L'astromobile poursuit sont ascension vers le flanc sud de « Marathon Valley » au Sol 4200, en parcourant 13 mètres sur une pente inclinée de 20 degrés et rejoint finalement la zone de son septième site d'hivernage (Winter Haven 7).

L'étude du terrain va reprendre lentement durant toute la durée du septième hiver martien, en longeant vers l'ouest la crête « Knudsen Ridge » qui se trouve sur le mur sud de

« Marathon Valley ». Le robot se positionne ensuite devant une nouvelle cible d'intérêt géologique baptisée « Pvt Hugh McNear » entre les Sols 4211 et 4221, incluant une séance de brossage de l'affleurement au Sol 4219. L'astromobile se déplace ensuite de d'environ 4,5 mètres afin de rejoindre l'affleurement rocheux dénommé « Pvt. John Potts ». Le rover qui est maintenant perché sur une pente raide fortement inclinée de plus de 30 degrés, va faire l'étude de la roche durant plus d'un mois entre les Sols 4229 et 4262, soit du 16 décembre 2015 au 19 janvier 2016. L'outil d'abrasion RAT est utilisé à plusieurs reprises pour creuser dans la roche (Figure 174), suivis à chaque fois par des prises de vue du micro imageur MI et par des analyses de longues durées effectuées par le spectromètre APXS. Une première séance de brossage est programmée pour enlever la poussière située à la surface de la cible au Sol 4234, suivis par trois séances de broyages avec la RAT aux Sols 4244, 4255 et 4257, ayant pour objectif de creuser la croûte de surface plus profondément sur une profondeur de deux millimètre. La RAT est utilisé une dernière fois sur « Pvt. John Potts » au Sol 4259, afin de nettoyer la surface de la roche pour enlever les derniers résidus de poussières sur la cible (Figure 174). L'exercice avait pour objectif de fournir une surface propre au spectromètre APXS, qui doit par la suite identifier les éléments chimiques qui compose la roche. Entre temps, le solstice d'hiver est passé sur le Sol 4246 le 3 janvier 2016, et trois semaines plus tard sur le Sol 4267 le 24 janvier 2016, Opportunity fête son douzième anniversaire à la surface de la planète Mars. L'astromobile rejoint ensuite un nouveau site d'étude d'intérêt géologique, après avoir franchis une courte distance de 8,8 mètres vers le sud-ouest entre les Sols 4269 et 4270.

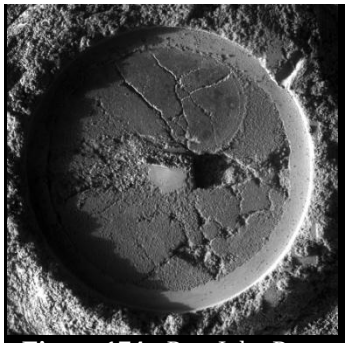


Figure 174 : Pvt. John Potts (Crédit : NASA/JPL-Caltech)

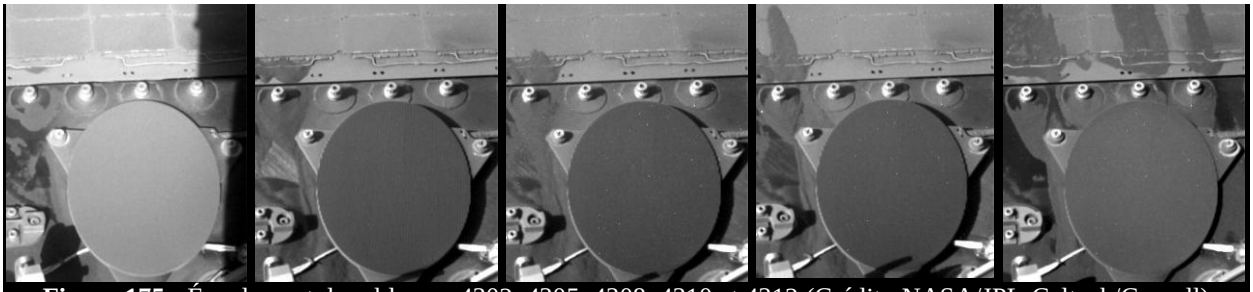


Figure 175 : Écoulement de sable aux 4302, 4305, 4308, 4310 et 4312 (Crédit : NASA/JPL-Caltech/Cornell)

Un mois plus tard, après avoir fini la campagne d'étude du terrain. Le rover se remet en route en direction de la cible « Pvt. Joseph Whitehouse », qui est situé sur un terrain très difficile au sommet d'une pente de « Knudsen Ridge ». Mais devant les difficultés rencontrées sur le terrain, et après avoir effectué trois tentatives entre les Sols 4304 et 4311 pour se placer devant la cible, qui est perché au sommet d'une pente très glissante sur un fond de gravier présentant une inclinaison de plus de 32 degrés (un record d'inclinaison). Le petit robot Opportunity a dut abandonner l'approche de sa cible initiale, et de rebrousser chemin en se déplaçant plus bas vers le nord en direction du plancher de « Marathon Valley », dans le but de rejoindre une nouvelles cibles d'intérêts géologique qui se trouvent 50 mètres plus loin au sud-ouest. Deux séries de

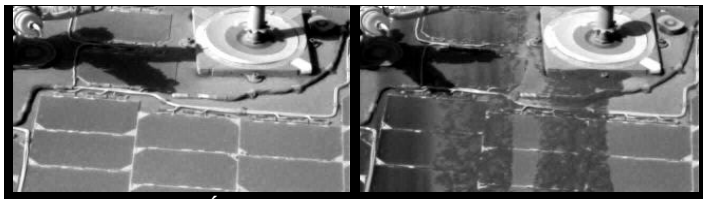


Figure 176 : Écoulement de sable au Sol 4310 et 4312 (Crédit : NASA/JPL-Caltech/Cornell)

Figure 177 : Dust Devil au Sol 4332 (Crédit : NASA/JPL/James Sorenson)

Figure 178 : Sacagawea, après un parcours de 47,1 mètres effectué en 4 Sols (Crédit : NASA/JPL-Caltech/Cornell)

de photos pointant sur les panneaux solaires entre les Sols 4302 et 4312 (Figure 75 et 76), ont dévoilé la présence d'un petit écoulement de poussières durant cette période, éboulis qui a été provoqué par la rupture d'équilibre des poussières subissant des vibrations avec une forte inclinaison du robot. Avant de quitter définitivement les lieux au Sol 4311 (10 mars 2016), le rover a surpris pour la quatrième fois de sa mission un petit tourbillon de poussière a peine visible qui évoluait au loin sur la ligne d'horizon à l'intérieur de la cuvette du cratère « Endeavour ». Puis, trois semaines plus tard vers la fin des activités du robot au Sol 4332 le 31 mars 2016. L'astromobile a eu de nouveau la chance de photographier au fond de la vallée un spectaculaire « Dust Devil » en pleine action (le cinquième : Sol 2301, 3182, 3514, 4311 et 4332), et qui évoluait beaucoup plus près que le précédent à seulement quelques kilomètres de distance dans la cuvette du cratère « Endeavour » (Figure 177). Les rafales de vents de ses différents évènements ont permis de nettoyer une partie de la poussière qui recouvrait les panneaux solaires, tout en améliorant le bilan énergétique du rover qui est passé de 548 watts/heure au Sol 4310 à plus de 650 watts/heure au Sol 4333.

Après une visite éclaire des trois sites de travail dénommés « Station » entre les Sols 4334 et 4344, terrain qui se trouve à la périphérie sud des zones de détection du spectromètre orbitale infrarouge CRISM de MRO, et qui présentait une forte signature de minéraux argileux de type smectite. Opportunity se déplace ensuite sur une courte distance de 2,5 mètres vers la cible « Pierre Pinaut 3 », qui se trouve au sud-est sur l'affleurement rocheux baptisée « Pierre Pinaut ». Il s'agit d'une autre brèche d'impacte de la formation « Shoemaker » que le rover va étudier durant un mois entre les Sols 4350 et 4375 (du 14 avril au 15 mai 2016), dans le but d'amorcer une vaste campagne d'étude faite en profondeur avec l'utilisation de la RAT. Entre les Sols 4347 et 4375, l'astromobile entame le vaste panorama « Sacagawea » de « Marathon Valley » (Figure 178), avec « Knudsen Ridge » dans la moitié droite et le plancher du cratère « Endeavour » au centre de l'image. Une première séance de brossage va être effectuée au Sol 4357 pour

Figure 179 : Pierre Pinaut 3 (Crédit : NASA/JPL-Caltech)

dépoussiérer et nettoyer la surface de la roche, suivit d'une séance de broyage sur le Sol 4363 le 3 mai 2016 qui a atteint une profondeur de 2 à 3 mm. Deux nouvelles séances de brossages seront également programmées aux Sols 4370 et 4373 pour fournir une surface propre aux différents instruments d'analyse du robot. Les séances ont été suivit à chaque fois par des analyses standards effectuées par le micro-imageur MI et par le spectromètre APXS, avec des temps d'intégrations de longue durée (Figure 179). Après un court déplacement, l'astromobile fait glisser sa roue avant gauche au Sol 4377 (Figure 180:a), dont l'objectif est de remuer le champ de cailloux à la surface du sol. L'étude du site va se poursuivre jusqu'au Sol 4398 (8 juin), avec en prime la détection de la plus forte teneur en soufre de la mission avec 25% (SO_3). Les résultats proviennent des analyses effectuées par le spectromètre APXS, combiné à l'analyse fait à partir de l'imagerie multi spectrale sur le petit caillou « Pvt. Joseph Field » (Figure 180:b). Ce qui semble indiquer la présence de sulfate de magnésium, résultant d'une légère altération par l'eau à travers les zones de fracture dans le sol.

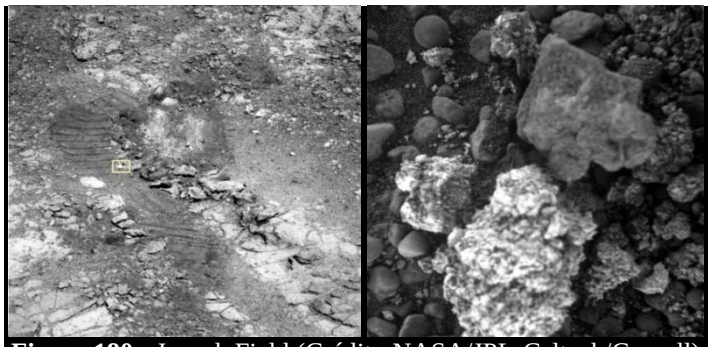


Figure 180 : Joseph Field (Crédit : NASA/JPL-Caltech/Cornell)

Le dixième plan d'extension de la mission est présenté le 24 mai 2016 (Sol 4383), et accepté un mois plus tard le 1er juillet (Sol 4419) avec une prolongation supplémentaire de deux ans jusqu'en 2018. Entre les Sols 4411 et 4415, s'est le tour de l'affleurement « York » a subire durant deux semaines une vaste campagne d'analyse avec brossage de sa surface au Sol 4412 le 22 juin 2016. À partir du Sol 4423, le rover part explorer le plancher et les parois du mur nord de « Marathon Valley ». L'équinoxe de printemps arrive dès le lendemain sur le Sol 4424 (5 juillet). Et au Sol 4440 le 21 juillet, Opportunity fête l'avènement du 40iem anniversaire de l'atterrissage réussie de Viking 1 sur la planète rouge. Trois jours plus tard au Sol 4443, le robot franchis le cap de son quarante-troisième kilomètre parcourus à la surface de Mars en se dirigeant vers le nord en direction des falaises de la crête nord de « Marathon Valley » dénommé « Gilbralter II », que le robot va rejoindre au Sol 4453. Après avoir fait l'étude de plusieurs cibles et des rainures serpentant sur le sol, qui ressembles à d'ancien nid de ruisseaux. L'astromobile quitte la région de la crête nord en se déplaçant vers le sud-est en direction de « Lewis and Clark Gap » au Sol 4477, dans le but de trouver une voie de sortie à travers la crête sud de « Marathon Valley ». Après une exploration de plus de dix-sept mois et demie dans « Marathon Valley », avec une distance parcourus de plus de 1 160 mètres. Opportunity quitte définitivement « Marathon Valley » au Sol 4485 le 4 septembre 2016, et le robot toujours prêt pour entamer une nouvelle aventure sur Mars qui est de rejoindre « Cape Byron » qui se trouve à plus de 2 kilomètres plus loins vers le sud.

VERS CAPE BYRON
(Sol 4486 à 5111)

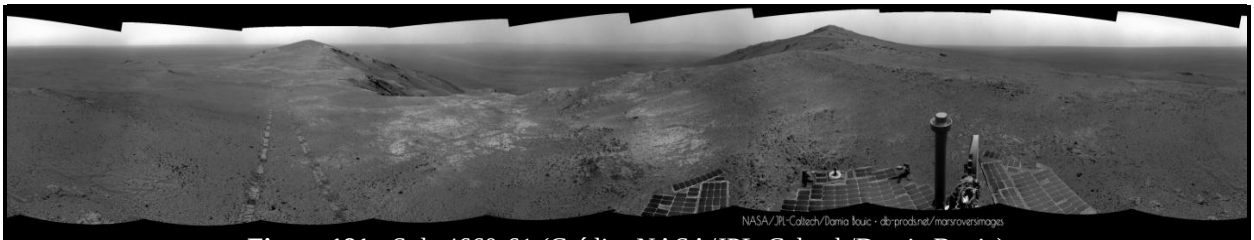


Figure 181 : Sols 4660-61 (Crédit : NASA/JPL-Caltech/Damia Bouic)

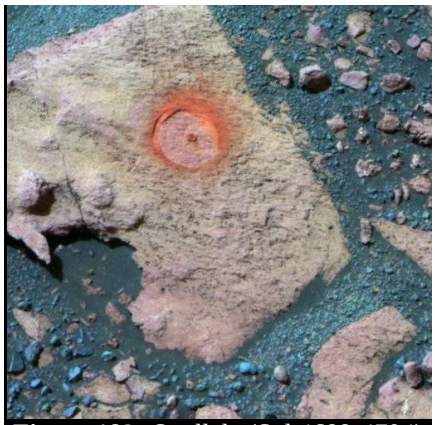


Figure 182: Ogallala (Sol 4699-4704) (NASA/JPL-Caltech/Cornell/ASU)

Après avoir parcourus près de deux cents mètres en roulant vers l'Est à travers la crête ouest du cratère « Endeavour », déplacement effectuées avec six séances de roulement quotidien en deux semaines entre le 6 et le 20 septembre 2016, soit entre les Sols 4486 et 4500. L'astromobile s'arrête sur le sommet du petit monticule « Spirit Mound » et entame une vaste campagne d'étude des environs, incluant un affleurement rocheux aux tons clairs baptisé « Gasconade » (Sols 4500-4546), puis reprend la route vers le sud-ouest en direction de « Meridiani Planum » au Sol 4546. Le rover fête son treizième anniversaire à la surface de la planète Mars le 24 janvier 2017 (Sol 4622), et franchis son 44^{ième} km deux semaines plus tard le 7 février (Sol 4636). Le 6 mars 2017 (Sol 4662), le robot redescend de la crête ouest du cratère « Endeavour » et se retrouve de nouveau à rouler sur le plancher de « Meridiani Planum » (Figure 181). Le but est de longer par l'extérieur le bord de la crête Ouest du cratère « Endeavour » en direction plein Sud vers « Perseverance Valley ». Trois semaines plus tard, Opportunity fête sa septième année martienne au Sol 4681. Le 19 avril 2017 (Sol 4705), après avoir brossé la surface de « Ogallala » (Sol 4700), suivit plus tard d'une séance de broyage au Sol 4704 (Figure 182). L'astromobile franchit pour la dernière fois une distance de conduite quotidienne qui est supérieur au cent mètres, en ajoutant 131,4 mètres supplémentaire au compteur.

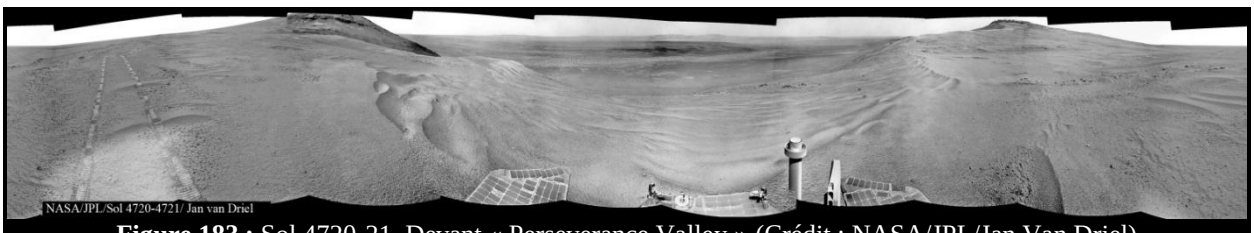


Figure 183 : Sol 4720-21, Devant « Perseverance Valley » (Crédit : NASA/JPL/Jan Van Driel)

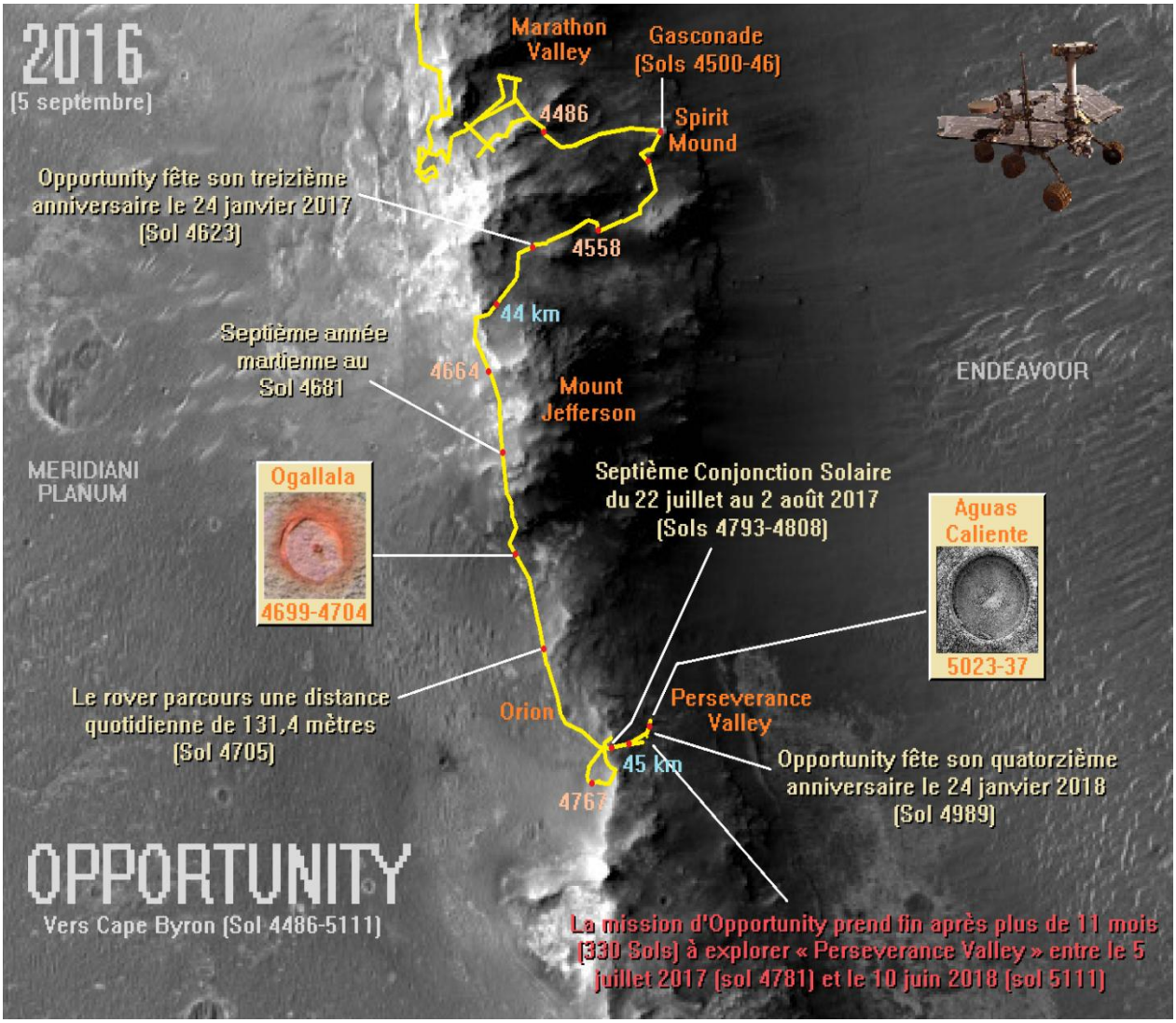


Planche 26 : Carte du trajet final d'Opportunity entre les Sols 4486 et 5111. La photo d'arrière-plan a été obtenue grâce aux données fournies par la caméra Hirise de Mars Reconnaissance Orbiteur (MRO) le 30 Mai 2014 (ESP_036753_1775). Position et trajet des rovers guidée par les cartes de la NASA et de Phil Stooke.

Le 29 avril 2017 au Sol 4715, le rover contourne par le nord-ouest dans le sens anti-horraire le petit cratère « Orion » de 25 mètre de diamètre. Et après avoir parcouru plus de 660,7 mètres en 57 Sols sur le plancher de « Meridiani Planum », exécutées en 20 séances de conduite quotidienne entre les Sols 4663 et 4720. Opportunity arrive finalement à l'entrée de « Perseverance Valley » au Sol 4720 le 4 mai 2017 (Figure 183). D'une largeur d'environ 20 mètres, la vallée s'étend vers le bas sur environ 180 mètres avec une pente de 23,5 degrés jusqu'au plancher du cratère « Endeavour », dont la formation remonte à la période du Noachien il y a 3 à 4 milliards d'années lorsque Mars était plus chaud et plus humide. Après avoir exploré quelque peut les alentours durant plus de deux mois. Le rover rente finalement dans la vallée « Perseverance Valley » le 5 juillet 2017 (Sol 4780), avec comme objectif de trouver un site pour s'installer avec une pente présentant une inclinéson de 5 degrés ou plus vers le Nord en direction du soleil (l'inclinaison final sera de 9,4 degrés), afin de s'assurer de ne pas manquer d'énergie et de passer à travers la septième conjonction solaire prévu entre le 22 juillet et le 2 août 2017 (Sols 4797-4807).

La barre du 45^{ièm} km est franchit le 9 octobre 2017 (Sol 4874), et le huitième solstice d'hiver dans l'hémisphère sud de Mars arrive un mois plus tard le 19 novembre 2017 (Sol 4907). L'astromobile a enregistré des températures hivernal très basses pouvant varier entre -96 ^{o}C la nuit et 2 ^{o}C le jour, soit une variation quotidienne de 98 ^{o}C. Le rover passe la plupart de son temps à recharger ses deux batteries, et c'est également le deuxième hiver en mode RAM. Vers la fin du mois de janvier 2018, plusieurs événements éoliens sont venus nettoyer grandement les panneaux solaires du robot, faisant grimper le bilan de production électrique à 644 watts/heure. Opportunity fête son quatorzième et dernier anniversaire à la surface de Mars le 24 janvier 2018 (Sol 4978), avec une puissance moyenne de 620 watts/heure. Pour fêter l'exploit du 5000^{iem} Sols, le rover exécute son premier autoportrait de la mission entre les Sols 4998 et 5006, soit du 14 au 22 février 2018 (Figure 184). Opportunity utilise son outil d'abrasion de roche (RAT) pour la première fois depuis 322 Sols (depuis Ogallala au sol 4704), pour brosser la cible « Aguas Caliente » (Figure 185) le 14 mars 2018 (Sol 5026). Et le lendemain la roche est creusée plus profondément (15 mars 2018). Le site « San Juan Pueblo » caractérisé par un affleurement composé de roches vitreuses sombres et pleines de trous (Figure 186), est étudié durant plus de deux semaines entre le 29 mars et le 14 avril 2018 (Sols 5040-56). Il s'agit d'un nouveau type de roche que le rover rencontre pour la première fois sur le sol martien. Lors d'un court déplacement sur le Sol 5068 (26 avril 2018), Opportunity atteint la roche « Allende » (Figure 187) et l'occasion est trop belle pour amorcer une nouvelle campagne d'étude et d'analyse de trois jours entre les Sols 5070-73. La onzième extension de la mission est accepté le 2 Mai 2018, et Opportunity à le champ libre pour continue à rouler sur la planète Mars jusqu'en 2019. Du 13 mai au 10 juin 2018 (Sols 5084-5111), Opportunity entame le vaste panorama couleur baptisé « Panorama Legacy » composé de 354 images (Figure 188). Le bilan d'énergie en avril, mai et début juin sont très satisfaisant avec un niveau situé entre 640 et 680 watts/heure.

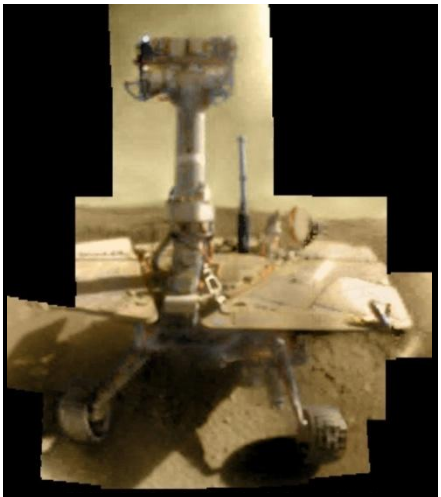


Figure 184 : Autoportrait
(Crédit : NASA/JPL-Caltech/Cornell/ ASU/James Sorenson & Don Davis)

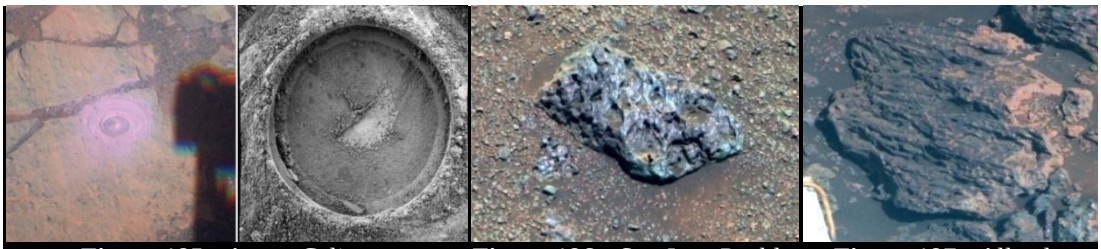


Figure 185 : Aguas Caliente **Figure 186 :** San Juan Pueblo **Figure 187 :** Allende
(Crédit : NASA/JPL-Caltech/Cornell, & 2^{iem} photo à partir de la gauche : Damia Bouic)

Faisant route vers « Cap Byron » depuis 625 Sols après le départ de « Marathon Valley », et toujours perché à la mi-hauteur sur les pentes de « Perseverance Valley ». Une tempête de poussières globale s'est levée sur Mars une semaine après l'arrivé de l'équinoxe du printemps au Sol 5101 le 30 mai 2018. La production d'énergie du rover chute du tiers de sa puissance passant de 660 à 463 watts/heure entre le 1er et le 2 juin (Sol 5103-4), avec un facteur Tau évoluant de 0,61 à 1,548. Une nouvelle chute de puissance survient deux jours plus tard sur le Sol 5106 avec 365 watts/heure et un facteur Tau augmentant à 2,1. Puis la production d'énergie passe à un seuil

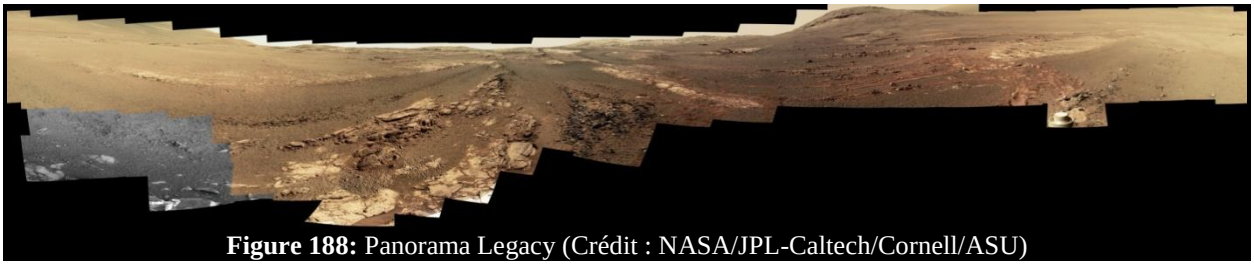


Figure 188: Panorama Legacy (Crédit : NASA/JPL-Caltech/Cornell/ASU)

critique le 5 juin 2018 (Sol 5107) à seulement 123 watts/heure avec un facteur Tau évaluer à 4,9. La dernière mesure du facteur Tau prise le 10 juin (Sol 5111) au réveil du rover à -29 ^{o}C, indiquait une valeur record de 10,8 contre 5,5 au plus fort de la tempête globale de 2007. La puissance électrique était très basse avec seulement 22 watts/heure, soit nettement inférieur au minimum de 90 watts/heure qu'Opportunity a besoin pour se maintenir fonctionnel. Privé d'énergie solaire pour recharger ses batteries, le rover a enclenché le mode "Deep Sleep" (sommeil profond) pour ne plus jamais se réveiller. La dernière communication du rover avec la terre a été reçue le 10 juin 2018 sur le Sol 5111 (5261 jours terrestres), et la tempête c'est terminé deux mois plus tard à la fin du mois d'août. La mission sera définitivement déclaré terminée en janvier 2019 après plusieurs tentatives de communications échouées. Le rover Opportunity a exploré la planète Mars durant un peut moins de quatorze ans 5 mois et 6 jours avec une distance parcourus de 45,16 km en 5111 Sols. L'astromobile équipé de dix caméras a envoyé 217 594 images à la terre, et à l'aide d'un pinceau métallique Opportunity a nettoyée la surface de 72 roches et creusée plus profondément sur 52 d'entre elles avec son outil d'abrasion RAT (Rock Abrasion Tool). Un totale de 2 560 mesures spectrale auront été effectué par les trois spectromètres du rover, soit 489 par le spectromètre Mössbauer, 988 par le spectromètre Alpha Particle X-Ray (APXS) et 1083 par le spectromètre Mini-Thermal Emission (Mini-TES).

Dans les plaines sombre de « Meridiani Planum », Opportunity a roulée à travers le lit d'anciennes plages acides ou régnait jadis une mer peut profonde d'eau très salée. En s'évaporant, l'eau à laisser place à de vastes dépôts de sels, de sédiments et de dune, qui se sont lentement transformé en roches sédimentaire sculpté par le vent. Érodée et transportés par le vent sur une vaste étendue de temps pouvant se compter en centaine de milliers d'années à travers différentes ères géologique de Mars. Ces sédiments qui ont été cimentées puis altéré à différentes occasions par l'action directe de l'eau lors de la remonté d'eaux souterraines (variation climatique, éruption volcanique, chute de météorites, etc.), ou encore lors d'éruption volcanique éjectant dans l'atmosphère martienne de vaste quantité de soufre dans l'atmosphère martienne qui en se déposant se sont transformé en sulfate. L'environnement acide et salé n'aurait pas été particulièrement agréable pour la vie, mais plus tard dans la mission d'Opportunity il a été constaté de la présence d'eau au pH neutre (« Cap York »), qui avait aussi percolé à la surface à de nombreuses époques et à travers des fractures retrouvées dans les roches argileuses qui constituaient par endroit la bordure de la crête nord-ouest du cratère « Endeavour ».

De l'autre côté de la planète dans le cratère « Gusev », Spirit à également découvert différents types d'environnements et de matériaux aqueux. Après avoir traversé une plaine sombre et désertique, monté sur une colline de 80 mètres de haut, puis de redescente pour finalement rejoint de l'autre côté le petit plateau « Home Plate » de 90 mètres de diamètre au début 2006. Spirit a explorés des endroits où d'anciennes fumerolles et des sources chaudes hydrothermales ont laissées de grands dépôts de silice et de sels de sulfate.

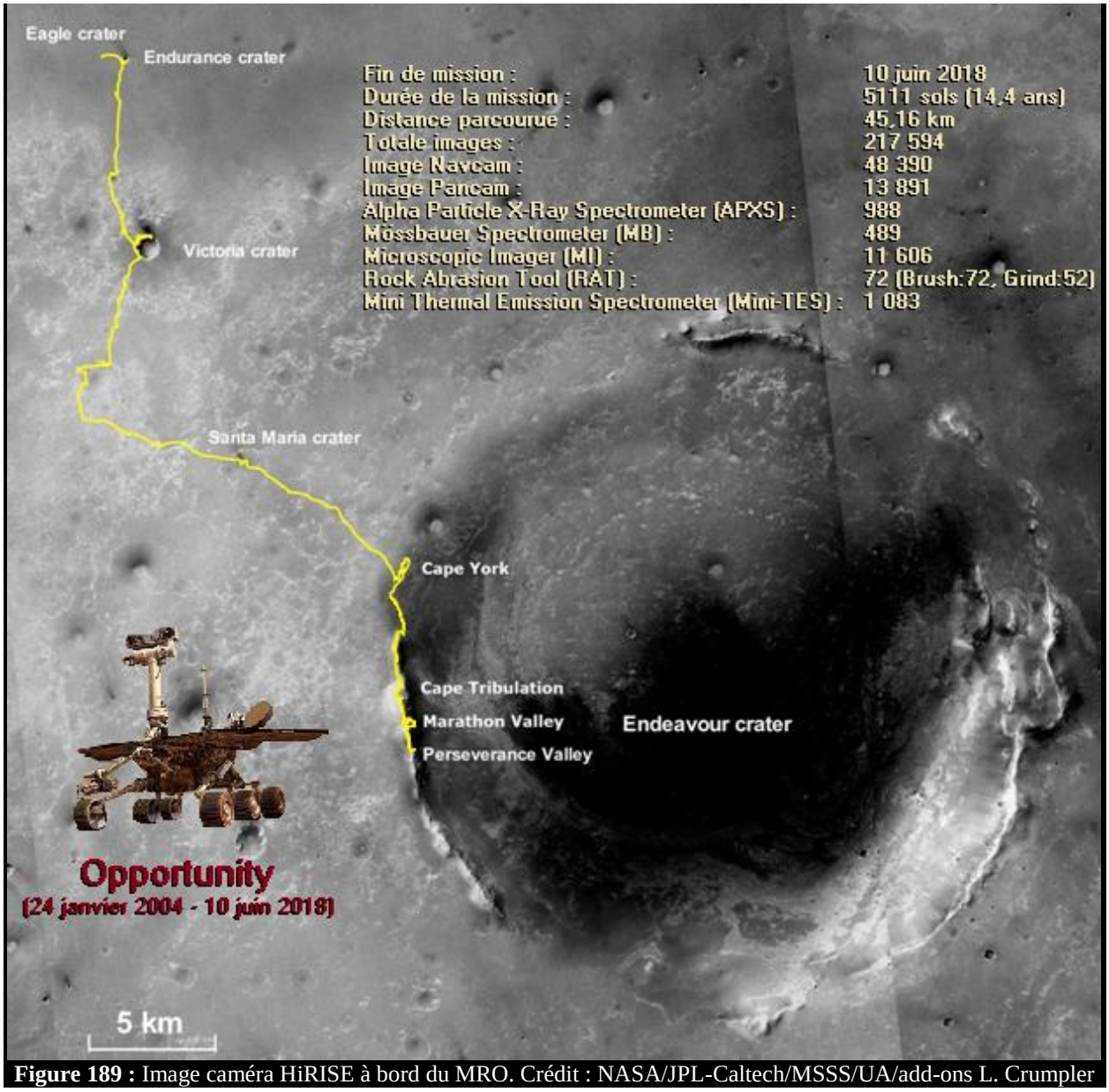


Figure 189 : Image caméra HiRISE à bord du MRO. Crédit : NASA/JPL-Caltech/MSSS/UA/add-ons L. Crumpler

Pour aller plus loin:

- Ancient Aqueous Environments at Endeavour Crater, Science janvier 2014, Vol 343. https://dash.harvard.edu/server/api/core/bitstreams/7312037d-2809-6bd4-e053-0100007fdf3b/content

- AGU: Results From the Mars Exploration Rover Spirit and Opportunity Missions https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/toc/10.1002/(ISSN)2169-9100.MERMISS1

Lien pour les Cartes plus détaillé du trajet d'Opportunity sur Mars :

Sol 1-915 de Phil Stooke
https://umsfarchive.com/index.php/viewtopic.php?p=64969#p64969
Sol 929-1697 d'Eduardo Tesheiner
https://umsfarchive.com/index.php/viewtopic.php?p=129996#p129996
Sol 1286-1659 d'Eduardo Tesheiner
https://umsfarchive.com/index.php/viewtopic.php?p=126871#p126871
Sol 1697-2279 d'Eduardo Tesheiner
https://umsfarchive.com/index.php/viewtopic.php?p=161388#p161388
Sol 2193-2462 d'Eduardo Tesheiner
https://umsfarchive.com/index.php/viewtopic.php?t=681&start=2925
Sol 2450-2681 d'Eduardo Tesheiner
https://umsfarchive.com/index.php/viewtopic.php?p=177308#p177308
Sol 2667-3410 d'Eduardo Tesheiner
https://umsfarchive.com/index.php/viewtopic.php?p=202800#p202800
Sol 3410-3506 de Phil Stooke
https://umsfarchive.com/index.php/viewtopic.php?t=681&start=3255
Sol 3506-3622 de Phil Stooke
https://umsfarchive.com/index.php/viewtopic.php?p=208661#p208661
Sol 3653-3705 de Phil Stooke
https://umsfarchive.com/index.php/viewtopic.php?p=210692#p210692
Sol 3744-3929 de Phil Stooke
https://umsfarchive.com/index.php/viewtopic.php?p=218214#p218214
Sol 3923-4200 de Phil Stooke
https://umsfarchive.com/index.php/viewtopic.php?p=228134#p228134
Sol 4200-4477 de Phil Stooke
https://umsfarchive.com/index.php/viewtopic.php?p=232362#p232362
Sol 4479-4659 de Phil Stooke
https://umsfarchive.com/index.php/viewtopic.php?p=234861#p234861
Sol 4663-4720 de Phil Stooke
https://umsfarchive.com/index.php/viewtopic.php?p=235708#p235708
Sol 4720-4922 de Phil Stooke
https://umsfarchive.com/index.php/viewtopic.php?p=237804#p237804
Sol 4922-5100 de Phil Stooke
https://umsfarchive.com/index.php/viewtopic.php?p=239563#p239563

LES PANORAMIQUES DE PHOENIX

La mission Phoenix Mars Lander de l'agence spatiale américaine était très différente des missions d'explorations de la surface martienne précédentes. Il s'agissait de la première mission du Programme « Mars Scout » qui se voulait moins ambitieux et peu coûteux, ayant comme objectif fondamental d'approfondir les découvertes les plus récentes effectuées par des missions d'explorations de plus grandes envergures. La mission Phoenix a été développée en 2003 suites aux résultats scientifiques fournis par le spectromètre à neutron de l'orbiteur Mars Odyssey en 2002, qui étaient axées sur la découverte de vaste concentration de glace d'eau enfouie à quelques mètres de profondeur dans le sous-sol de l'hémisphère nord de la planète. L'atterrisseur Phoenix a hérité d'une suite d'instruments scientifiques les plus avancés pour l'époque, qui avaient été développé à l'origine pour les missions Mars Polar Lander et Mars Surveyor 2001. La plate-forme d'atterrissage et certains instruments embarqués sur la sonde viennent du recyclage des composantes de Mars Surveyor 2001, dont la mission a été abandonnée en 2000 après l'écrasement de la sonde Mars Polar Lander à la surface de la planète Mars le 3 décembre 1999. Le nom de Phoenix fait donc référence à l'oiseau mythique qui pouvait renaître de ses propres cendres à cause du recyclage des composantes de Mars Surveyor 2001.

L'objectif principal de la mission de Phoenix était de mieux connaître l'histoire géologique de l'eau sur Mars, afin de déterminer le potentiel d'habitabilité du sol martien dans les régions polaires boréales de la planète. Pour ce faire, la sonde était équipée de différents instruments scientifiques qui étaient capables de rechercher la trace d'eau sous toutes ses formes dans le pergélisol et l'atmosphère de la planète, tout en ayant la possibilité de détecter la présence de composée volatile et organique (Figure 2). Phoenix a été la sixième sonde à se poser avec succès à la surface de la planète Mars, et la première sonde à effectuer des recherches en exobiologie depuis les missions Vikings, dont le but était d'examiner la possibilité de trouver d'éventuelle trace de vie organique éteinte ou actuelle enfouis dans le sol martien. Certains microorganismes extrêmophiles de type endolithique peuvent survivre dans le sol à l'état de spore dormant et résister aux conditions extrêmes qui règnent dans le sol gelé de la planète Mars, pour ensuite revenir à la vie quand les conditions climatiques à la surface redeviennent plus propices à leur survie.

Figure 1 : Lancement de Phoenix (Crédit : NASA)

Pour la toute première fois dans l'histoire de l'exploration spatiale, la mission allait être menée par une Université publique (l'Université d'Arizona) sous la tutelle de la NASA, avec un coût des opérations qui a été estimé à plus de 475 millions de dollars. Phoenix a été lancé du Cap

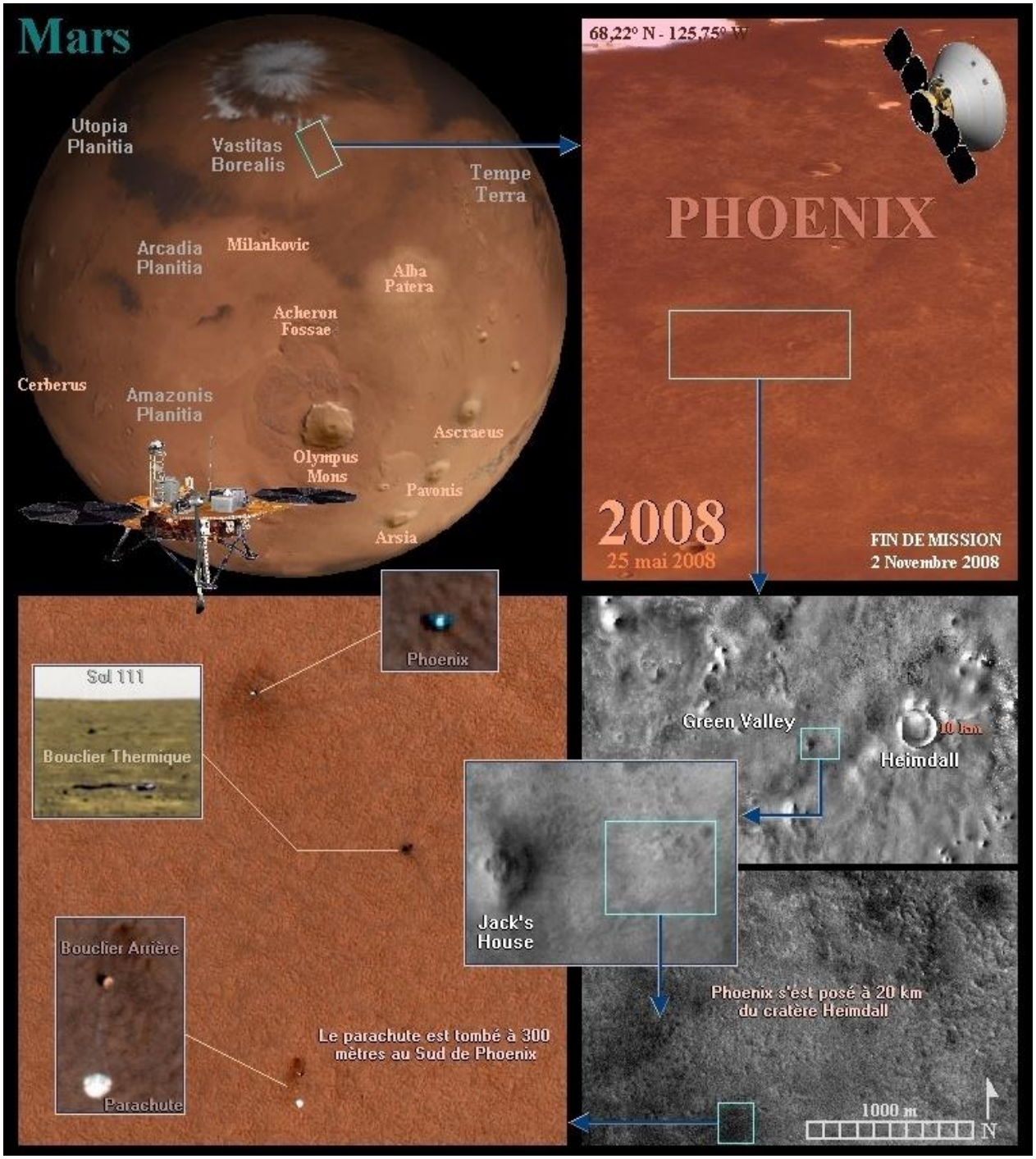


Planche 1 : Le site d'atterrissage de Phoenix obtenu grâce aux données fournies par la caméra Hirise de Mars Reconnaissance Orbiteur (MRO) le 26 mai 2008 (photo en bas à gauche), et le 19 mai pour la photo au centre à droite de Green Valley qui a été prise par la caméra à grand angle CTX. Les encadrés à gauche sur Phoenix et le parachute sont de la caméra Hirise de MRO pris le 20 juillet 2008, et l'encadré sur le bouclier thermique vient de la caméra de Phoenix pris sur le Sol 111 de la mission le 16 septembre. La photo du bas à droite a été prise le 24 janvier 2007 par la caméra Themis de l'orbiteur Mars Odyssey. Les 2 photos du haut ayant participées au montage de cette maquette proviennent des orbiteurs vikings.

Canaveral en Floride le 4 août 2007 à 9h26 UTC (Temps universel coordonné) par une fusée de type Delta II (Figure 1). Après un long voyage de plus de 275 millions de kilomètres parcourus

en neuf mois et trois semaines dans le froid et le vide de l'espace. La sonde Phoenix se pose finalement en douceur à la surface de la planète Mars le dimanche 25 mai 2008 à 23h38 (UTC), dans la région de « Green Valley » qui se trouve à l'intérieur de la vaste plaine arctique de « Vastitas Borealis » (*vaste étendue*). Le site d'atterrissage est situé près du pôle Nord de la planète dans le lit d'un ancien océan aujourd'hui disparu à 68,219° de latitude Nord par 125,749° de longitude Ouest (Planche 1), à une vingtaine de kilomètres au sud-ouest du cratère d'impact « Heimdall » de dix kilomètres de diamètres, et à plus de 1 000 km au nord-ouest de l'ancien volcan « Alba Patera ». Pour cette occasion les orbiteurs Mars Odyssey, Mars Express et Mars Reconnaissance Orbiteur (MRO) ont modifié leurs trajectoires orbitales pour être au rendez-vous avec la sonde Phoenix dans le but de l'assister au moment de son atterrissage. L'orbiteur MRO a même eu la chance de photographier la sonde Phoenix lors de sa descente en parachute dans l'atmosphère, avec en arrière-plan le grand cratère « Heimdall » vieux d'environ 500 millions d'années. Durant les cinq mois et huit jours qu'a duré la mission Phoenix sur Mars, qui ne devait durer initialement que trois mois, il a eu pour la première fois autour de la planète Mars six sondes d'explorations spatiales en activité. Il s'agit des orbiteurs Mars Odyssey, Mars Express et Mars Reconnaissance Orbiteur (MRO), des astromobiles Spirit et Opportunity, et de l'atterrisseur Phoenix qui est le premier engin spatial à se poser à proximité de la calotte polaire Nord de la planète.

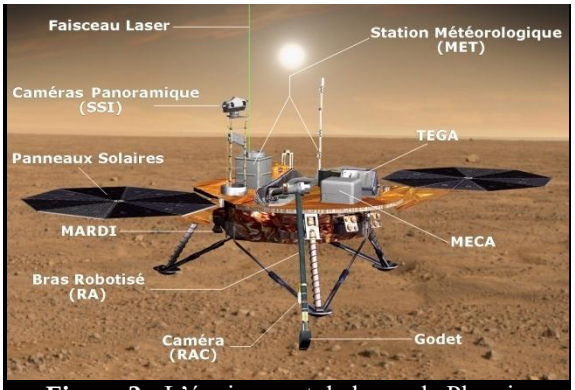


Figure 2 : L'équipement de la sonde Phœnix (Montage fait à partir des photos de la NASA)

Phoenix a utilisé 12 rétrofusées, technologie héritée du programme Viking, pour freiner sa chute en parachute durant les trente dernières secondes de sa descente avant d'atterrir en douceur à la surface de la planète Mars. Après une attente de 15 minutes, le temps de laisser les poussières soulevées par les rétrofusées de retomber sur le sol martien. Phoenix a déployé ses panneaux solaires pour recharger ses batteries au lithium, son mât météorologique MET (Meteorological Station fourni par l'Agence spatiale canadienne) et ses deux caméras stéréoscopiques S.S.I. (Surface Stereo Imager). Les premiers jours de la mission sont comme toujours consacrés au bon déploiement des différents instruments scientifiques de l'atterrisseur. Le paysage autour du site d'atterrissage de Phoenix est très différent de celui des autres missions d'explorations de surface. Il est pauvre en relief et en cailloux de grande taille, avec un terrain qui présente une texture en forme de polygone juxtaposé de quelques mètres de diamètre espacés par des fentes de dessiccation typiques des régions froides (Figure 5), qui semble résulter de l'alternance du gel et du dégel saisonnier du permafrost martien. Des petites collines sont cependant visibles à l'horizon, situé à une distance d'environ 15 km du site d'atterrissage. Nous sommes à la fin du printemps sur Mars et le soleil ne se couchera pas avant des mois. Les températures moyennes avoisinent les –26 °C le jour et –82 °C la nuit avec des vents de plus de 20 km/h.

Pour mener à bien sa mission sur Mars, Phoenix était équipé de sept instruments scientifiques très sensibles (Figure 2). L'atterrisseur possédait un bras robotisé R.A. (Robotic Arm) de 2,35 mètres de longueur avec quatre degrés de liberté, hérités de la sonde Mars Surveyor 2001, et qui était équipé à son extrémité d'un godet (Figure 20) pouvant creuser dans le permafrost martien jusqu'à une profondeur de 50 centimètres. Le bras était également équipé

Figure 3 : TEGA, image extrait de Happily Ever After

d'une caméra R.A.C. (Robotic Arm Camera) qui servait à prendre des images des échantillons contenus dans le godet, et d'une série de thermocouples (TECP : Thermal and Electrical Conductivity Probe) rivetés à son extrémité qui servait à mesurer la conductivité thermique et électrique du sol martien. Deux caméras stéréoscopiques S.S.I. (Surface Stereo Imager) de haute résolution avec 12 filtres de couleurs différents se trouvaient fixées au sommet du mât de deux mètres de haut. Phoenix était également équipé d'une caméra de descente MARDI (Mars Descent Imager), mais qui n'a malheureusement pas fonctionné lors de la descente, seul le microphone de cet instrument sera utilisé durant le reste de la mission sur Mars. Pour les expériences de chimie analytiques, l'atterrisseur avait à son bord un analyseur thermique de gaz T.E.G.A. (Thermal and Evolved Gas Analyzer) composé de 8 petits fours à usage unique, qui était composé à leur tour d'un petit cylindre d'environ un millimètre de large sur trois centimètres de long capables de porter progressivement des échantillons baignant dans une solution humide à une température de 1000 °C (Figure 3). Cet instrument hérité de la sonde Mars Polar Lander était combiné à un spectromètre de masse très sensible, qui avait pour tache d'analyser les échantillons de sol et de glace ramassés par le godet, puis déversés dans l'un des fours afin d'identifier les composés volatils et organiques qui étaient libérés lors du chauffage.

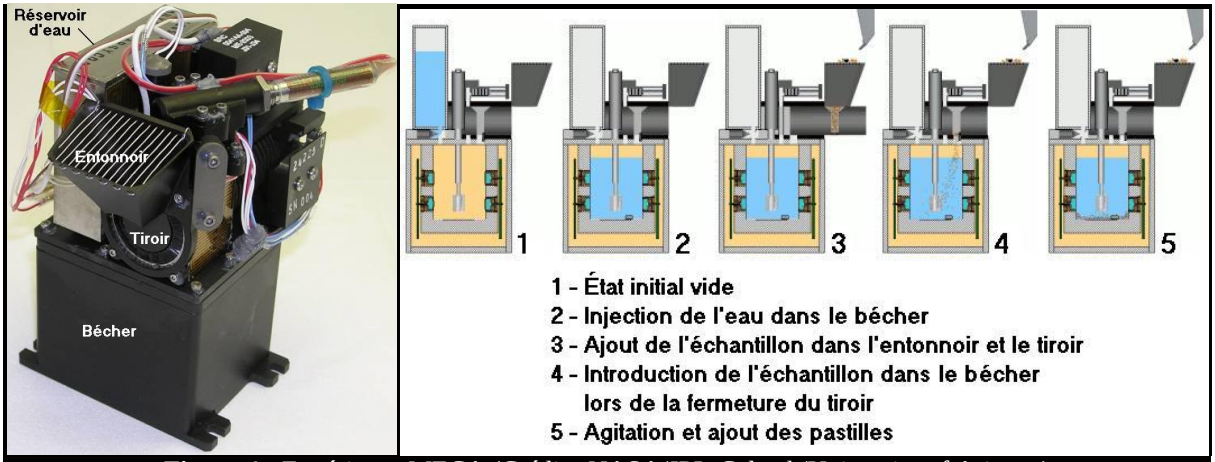


Figure 4 : Expérience MECA (Crédit : NASA/JPL-Caltech/University of Arizona)

Le deuxième type d'expérience de chimie analytique était réalisé par l'analyseur de microscopie, d'électrochimie et de conductivité MECA (Microscopy Electrochemistry and Conductivity Analyzer), hérité de la sonde Mars Surveyor 2001 (Figure 4). L'expérience MECA était organisée autour d'un véritable mini laboratoire d'analyse microscopique et chimique, qui utilisait trois instruments bien différents. Il s'agit en premier lieu du mini laboratoire de chimie en phase aqueuse composée de quatre petits béchers à usage unique. Dans lesquels les échantillons de sol étaient mixés à une solution à base d'eau ultra pure, qui était par la suite agitée durant environ une journée. Le but de cette expérience était de mesurer leur concentration en solutés analysés par 26 détecteurs qui donnaient des renseignements sur l'acidité, l'alcalinité et sur la concentration en magnésium, calcium, potassium et chlore. Cet instrument mesurait certaines

propriétés chimiques du sol martien comme le pH, le potentiel d'oxydoréduction, la salinité, la teneur en ions et la concentration en oxygène et en dioxyde de carbone. Différents protocoles sur l'ajout de pastilles réactives permettaient par la suite de détecter d'éventuel carbonate, des sulfates ou des molécules oxydantes. Le deuxième instrument qui faisait partie de l'expérience MECA était représenté par un port-échantillon monté sur une roue mobile, composée de 69 substrats différents recouverts d'un adhésif en silicone. Ce dispositif servait à générer différentes interactions entre les échantillons de sol et les substrats de l'appareil dans le but d'analyser leurs propriétés physiques. Les échantillons étaient ensuite acheminés et examinés à différents grossissements par un troisième instrument composé d'un ensemble de deux microscopes, soit un microscope optique couleur d'une résolution de 4 microns/pixel et un microscope à force atomique (FAMARS). Le microscope à force atomique utilise des capteurs à pointe microscopique extrêmement petite attachée à des leviers très flexibles et très sensibles, qui mesurent la surface d'un échantillon à l'échelle de cent nanomètres, soit cent fois plus petites que la résolution du microscope optique. Les infimes variations des leviers sont recueillies pour construire une représentation numérique 3D de la forme de l'échantillon analysé.

Le dernier instrument embarqué à bord de la plate-forme d'atterrissage est la station météorologique canadienne M.E.T. (Meteorological Station), comprenant des capteurs de température et de pression fixée au mât de Phœnix, et un laser LIDAR (Light Detection and Ranging) fixé sur le pont de la plate-forme de l'atterrisseur. Le LIDAR est un laser à impulsion basé sur la télédétection, qui renseigne sur la taille et la concentration des particules en suspension. Le LIDAR envoie verticalement un faisceau laser de couleur vert, et analyse ensuite les échos qui sont réfléchis par les poussières et les aérosols en suspension dans l'atmosphère. Les données recueillies peuvent fournir des indications sur la structure et la hauteur des particules et des cristaux de glace contenue dans les nuages de type cirrus. La station MET à relever de manière quotidienne la température, la pression, la vitesse et la direction des vents, et les mesures ont servi à évaluer la quantité d'eau et de poussière (le facteur Tau) en suspension dans l'atmosphère de la planète Mars.

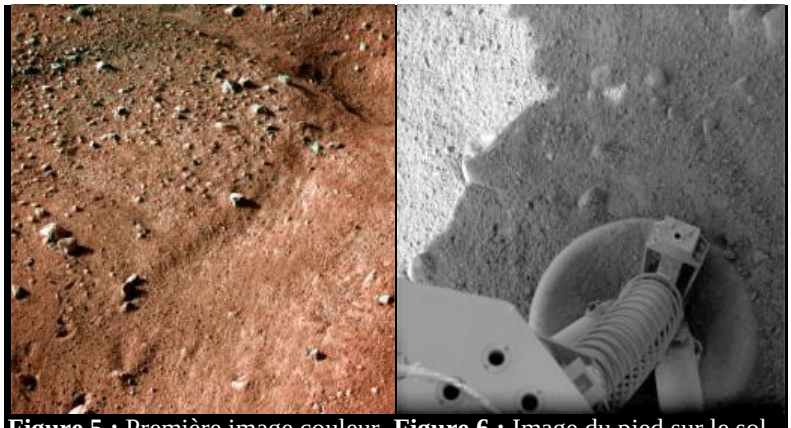


Figure 5 : Première image couleur **Figure 6 :** Image du pied sur le sol
(Crédit : NASA/JPL-Caltech/University of Arizona)

Les premières images arrivent deux heures après l'atterrissage, et elles montrent l'état de certains instruments qui se trouvent sur le capot de la plate-forme d'atterrissage. Une image qui montre l'état de l'un des pieds de l'atterrisseur posé sur le sol martien (Figure 6) a été prise en l'honneur des sondes Vikings, en nostalgie avec les premières images transmises par les sondes il

Figure 7 : Snow Queen
(Crédit : NASA/JPL-Caltech/University of Arizona)

y a 32 ans. La puissance électrique délivrée par les panneaux solaires est très bonne au début de la mission à l'approche du solstice d'été sur Mars prévue pour le 25 juin, et elle avoisine les 3 300 watts/heure par jour. La caméra HiRISE de haute résolution de l'orbiteur MRO a réussi à prendre deux photos du site d'atterrissage de Phoenix. La première image a été prise 11 heures après l'atterrissage et la deuxième 22 heures après (Planche 1). Phoenix déploie la station météorologique LIDAR au Sol 2, dans le but d'effectuer des tests sur les Sols suivants. Puis le lendemain, c'est le tour au bras robotique à être déployé pour préparer la station à recevoir le plus tôt possible des échantillons à analyser. L'appareil photo du bras robotique prend un cliché sous la plate-forme d'atterrissage au Sol 4 (29 mai), pour vérifier l'état du terrain sur lequel s'est posé l'un des pieds, et découvre sur le sol une surface lisse qui a été baptisée « Snow Queen » (Reine des Neiges), qui présente au centre deux cavités arrondies plus profondes de quelques centimètres nettoyées de toute poussière sur quelques centimètres de profondeur. Cette surface lisse ressemble beaucoup à une plaque de glace qui aurait été creusée par le souffle du jet de gaz chaud émis par les rétrofusées au moment de l'atterrissage (Figure 7).

Figure 8 : Observation de la sublimation dans Holy Cow au Sol 5, 8 et 142
(Crédit : NASA/JPL-Caltech/University of Arizona/Max Planck Institute)

Le bras robotique est utilisé de nouveau le lendemain sur le Sol 5, pour prendre une meilleure photo de la région située sous la plate-forme d'atterrissage. Les opérateurs de la NASA découvrent trois taches claires très brillantes sur les images (Figure 8), qu'ils ont baptisées « Holy Cow » (*Vache Sainte*), nettoyées de toutes poussières et qui ont la même configuration que l'alignement des rétrofusées. Cette région n'étant pas accessible au bras robotisé elle sera photographiée par la caméra RAC à plusieurs autres reprises durant la durée de la mission de Phoenix sur Mars, afin d'étudier sa structure et son comportement dynamique au cours du temps. Sur les clichés de « Holy Cow » on peut voir à la surface de l'une des tiges de soutien, qui se trouve à gauche sur les images, le reflet de ce qui ressemble beaucoup à des gouttes d'eau gelées et liquide (Figure 8:a). Cette eau proviendrait de l'action des rétrofusées du

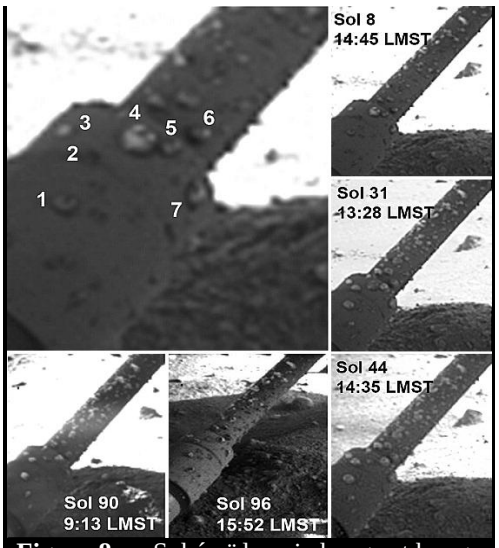


Figure 8 a : Sphéroïde qui change et bouge
(Crédit : NASA/JPL-Caltech/University of Arizona/Max Planck Institute)

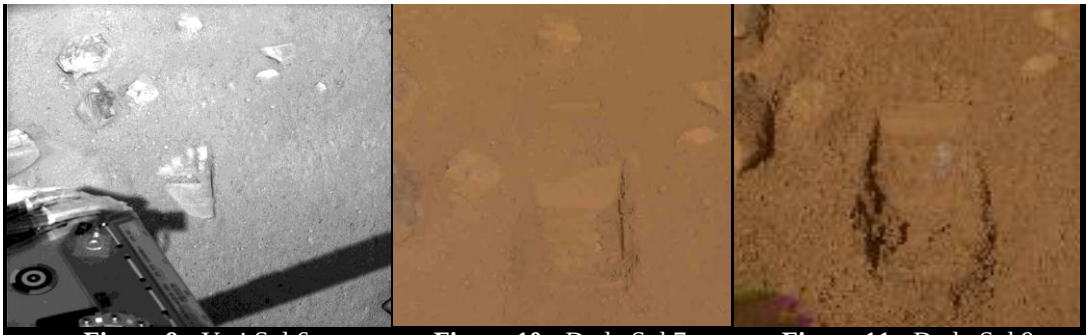


Figure 9 : Yeti Sol 6 **Figure 10 :** Dodo Sol 7 **Figure 11 :** Dodo Sol 9
Crédit : NASA/JPL-Caltech/University of Arizona (9), Texas A&M (10), color Mark Lemmon (11)

lander sur le pergélisol au moment de l'atterrissage, la chaleur faisant fondre la glace enfouis à faible profondeur dans le sol et l'eau aurait par la suite éclaboussée la tige de soutient de l'atterrisseur. En faisant une étude plus minutieuse des images de la figure 8:a, on peut voir l'aspect de certaines gouttelettes d'eau salines et gelées se déformer par sublimation, dont certaines ont soit grossi, ou sembles s'être déplacées (sphéroïde 4), ou encore ont fusionné (sphéroïdes 4 et 5) durant cet intervalle de temps. La plupart des sphéroïdes présentent une croissance substantielle entre les sols 8 et 44, ce qui suggère que l'humidité relative par rapport aux sphéroïdes a atteint une valeur maximale autour du Sol 44[21] [22].

Le godet fixé à l'extrémité du bras de Phoenix a exécuté avec succès sa première épreuve de contact avec le sol martien au Sol 6 (le 31 mai), en grattant légèrement la surface d'une cible baptisée « Yeti » (Figure 9) pour tester l'adhérence et la dureté du terrain. Un deuxième essai est mené à quelques centimètres au nord de « Yeti » au Sol 7 sur la cible dénommée « Knave of Hearts » (*Valet de Cœur*), ou une tranchée plus profonde baptisée « Dodo » (Figure 10) a été creusée pour tester la première véritable collecte d'échantillon de sol martien, et pour tester également le déversement du contenu du godet sur un site de décharge baptisé « Caterpillar » qui se trouve au nord-ouest de la zone d'échantillonnage. Les images de « Dodo » montrent une tranchée aux parois raides qui dévoilent des propriétés très adhésives et collantes. La cohésion des poussières qui tapissent les mûres de la tranchée est due par l'action combinée de certains types de sel et des molécules d'eau absorbées à la surface des grains, qui forme alors un mince film humide autour des grains de poussière et qui agit comme un ciment. On peut voir dans la région supérieure droite de la tranchée « Dodo » de la figure 10, une petite traînée de matière de teinte claire et blanchâtre qui se trouve au fond juste devant la petite zone d'éboulement. La même substance claire et blanchâtre se retrouve sur les images prises par la caméra RAC du bras robotique (Figure 12:Sol 7), qui montrent les poussières martiennes contenues dans l'échantillon de sol collecté par le godet. Ses dépôts ressemblent beaucoup à des dépôts de sels précipités de type évaporite ou à de la glace d'eau. L'ouverture des portes du four numéro 4 de TEGA est testée sur le Sol 8 le 2 juin, mais l'obturateur de la porte gauche refuse de s'ouvrir complètement. Ce qui oblige les opérateurs du bras de Phoenix à faire un autre test de collecte d'échantillons au Sol 9 sur le site d'essai dénommé « Knave of Hearts », dans le but de perfectionner les manœuvres d'extractions et de déversement des échantillons, et pour mieux comprendre les propriétés très adhésives des poussières martiennes qui forment des petites mottes qui adhèrent fortement sur les parois du godet.

[21] Possible physical and thermodynamical evidence for liquid water at the Phoenix landing site, 14 October 2009
[22] Results from the Mars Phoenix Lander Robotic Arm experiment, 02 October 2009

Figure 12 : Échantillon de sol contenu dans le godet aux Sols 7-9 et 11
(Crédit : NASA/JPL-Caltech/University of Arizona/Max Planck Institute)

La tranchée « Dodo » est creusée plus profondément au Sol 9 (3 juin) à l'emplacement de la traînée de matière brillante sur une profondeur d'environ 5 cm, ou le godet rencontre une structure plus ferme et plus résistante. Le godet dégage encore plus de matière brillante au fond de la tranchée (Figure 11), et les clichés fournis par la caméra RAC du bras montrent encore une fois des dépôts de matière blanche sur les poussières martiennes contenues dans l'échantillonnage du godet (Figure 12:Sol 9). Une nouvelle tranchée baptisée pour l'occasion « Goldilocks » (*Boucle d'Or*) de 9 cm de long sur 4 cm de profondeur, est creusée à droite de la tranchée « Dodo » au Sol 11 le 5 juin (Figure 14). Un échantillon dénommé « Baby Bear » (Bébé Ours) est prélevé jusqu'à 4 cm de profondeur et livré pour la première fois au mini laboratoire TEGA au four numéro 4 (TEGA-4), qui est le premier instrument de Phoenix à conduire une expérience d'analyse sur un échantillon de sol martien. La présence d'une substance blanche de teinte claire est également présente au fond de la nouvelle tranchée, ce qui suggère que Phoenix s'est posé au-dessus d'une grande étendue de pergélisol martien recouvert d'une mince couche de poussière de quelques centimètres d'épaisseur. La caméra du bras robotique RAC de Phoenix prend un nouveau cliché de l'échantillon contenu dans le godet, et dévoile encore une fois la présence de motte de poussière qui est recouverte de la même substance blanche (Figure 12:Sol 11).

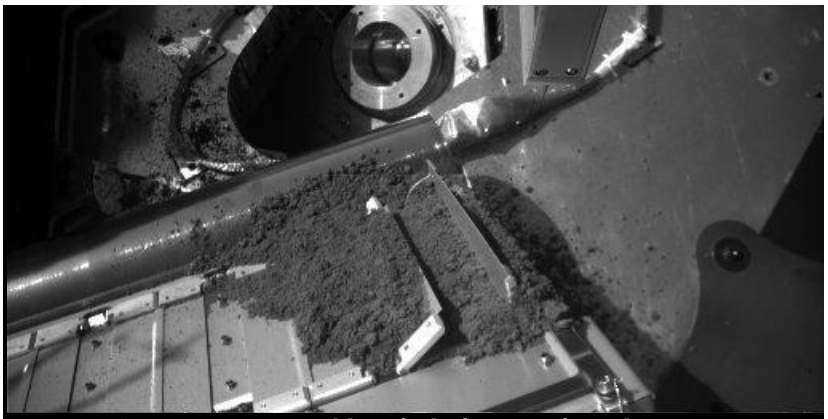


Figure 13 : La porte bloquée du four numéro 4 de TEGA
(Crédit : NASA/JPL-Caltech/University of Arizona/Max Planck Institute)

L'échantillon est déversé sur la grille de tamisage qui recouvre l'entré du four de l'instrument TEGA (TEGA-4) au Sol 12, qui a une porte qui est toujours partiellement ouverte. L'instrument attend la confirmation du détecteur infrarouge interne, qui doit indiquer la présence de grain de poussière dans l'entonnoir du four avant de passer à l'étape suivante de l'expérience qui est le chauffage de l'échantillon. La grille de tamisage est utilisée pour faire le tri, et d'empêcher les particules supérieures à un millimètre d'entrer et de tomber dans l'entonnoir du

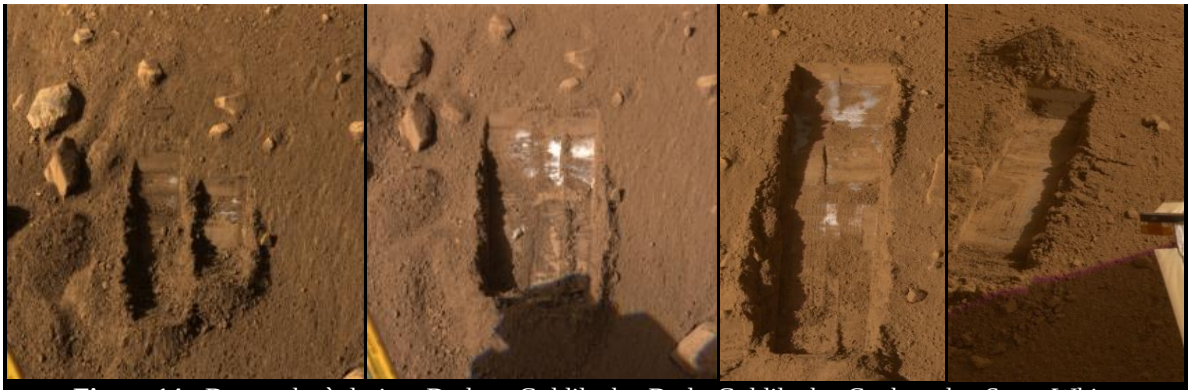


Figure 14 : De gauche à droite : Dodo et Goldilocks, Dodo-Goldilocks, Cupboard et Snow White (Crédit : NASA/JPL-Caltech/University of Arizona/Texas A&M University)

four. Mais une trop grande quantité de poussière a été déversée sur les portes du four numéro 4 de TEGA (Figure 13), et les mottes de poussières compactes et grumeleuses collent sur la grille en bloquant l'entrée du four qui ne reçoit pas d'échantillon à chauffer. Pour remédier à ce problème, les échantillons seront désormais écrasés et concassés sur une surface dure pour réduire la taille des particules avant d'être déversés sur la grille de tamisage des entonnoirs. Une nouvelle méthode de déversement des échantillons est également élaborée pour éviter à l'avenir de vider une trop grande quantité de matière sur les instruments. L'échantillon sera saupoudré en douceur sur les instruments par de petites vibrations du godet, qui sera déclenché lors de la mise en marche du moteur de la râpe qui se trouve derrière. Le mécanisme de vibration à vitesse variable de la grille est alors activé à sept reprises différentes sur les Sols suivants, dans le but de tamiser et de réduire la taille des mottes de poussière qui recouvre l'entrée du four. Cette procédure dégage finalement quelques grains de poussière qui tombent au fond de l'entonnoir au Sol 14 le 8 juin, mais la quantité n'est pas assez suffisante pour entamer une expérience d'analyse. Il faudra attendre jusqu'au Sol 16 avant que le détecteur interne du four numéro 4 de TEGA indique qu'il est plein. Phoenix effectue le même jour sa première étude conjointe de l'atmosphère martienne avec la sonde MRO. L'échantillon de sol baptisé « Mama Bear », récolté ultérieurement dans la tranchée « Goldilocks » au Sol 14, est livré pour la première fois à la roue du porte-échantillon de l'instrument MECA au Sol 17 le 12 juin. L'échantillon est par la suite conduit au microscope optique au Sol suivant, pour réaliser une observation plus fine des grains d'environ un dixième de millimètre capturés par l'appareil.

Les portes du four numéro 4 de TEGA (TEGA-4) sont fermées sur le Sol 18, et la première analyse d'échantillon s'échelonnant sur une période de 10 à 14 jours peut commencer. L'expérience est divisée en trois cycles de chauffage où la température est montée progressivement jusqu'à 1000 °C en plusieurs jours. Le premier palier de température est de 35 °C, et il a été atteint le même jour au Sol 18. Le deuxième palier qui est de 175 °C a été atteint deux jours plus tard sur le Sol 20, et le troisième palier de température est la cuisson finale avec chauffage à 1000 °C. Le chauffage progressif des échantillons permet d'identifier les composés chimiques selon la masse molaire et la température avec laquelle les ingrédients volatils ont été vaporisés, et les gaz émis sont ensuite analysés par le mini spectromètre de masse de TEGA. Les deux premiers paliers de chauffage réalisé sur le premier échantillon n'ont pas permis de détecter la trace de molécule d'eau. Un problème de mémoire flash de l'ordinateur empêche les activités scientifiques et entraîne la perte des images RAC stockées. Le troisième palier qui sera complété un peu plus tard au cours de la mission entre les Sols 28 et 30, a permis de détecter une petite

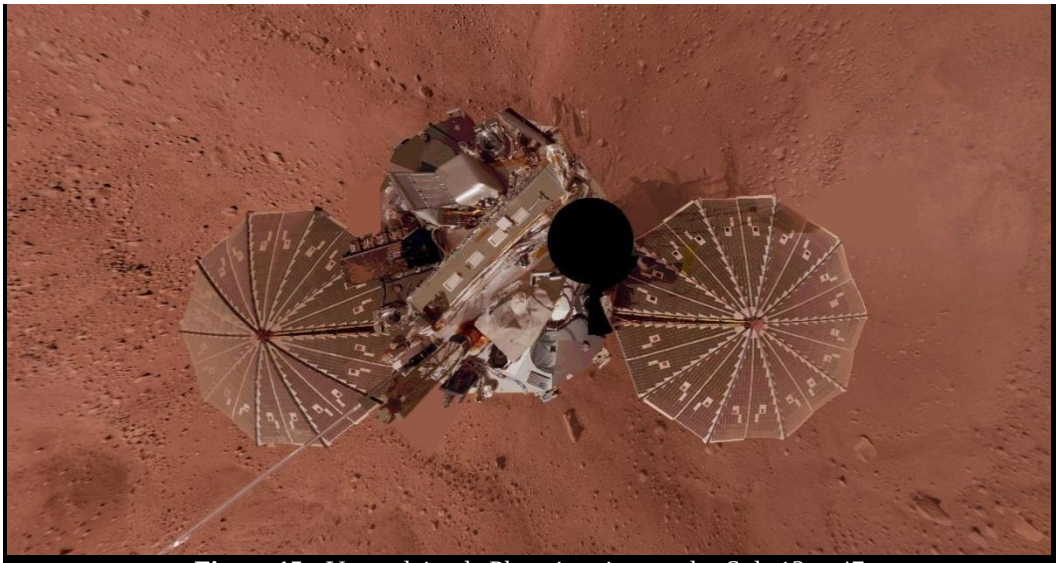


Figure 15 : Vue polaire de Phoenix pris entre les Sols 13 et 47
(Crédit : NASA/JPL-Caltech/University of Arizona/Texas A&M University)

quantité de CO_2 et de vapeur d'eau. Ce qui indique que l'eau est contenue dans les liaisons chimique des minéraux hydratés, et explique du même coût les propriétés très adhésives et collantes des poussières martiennes.

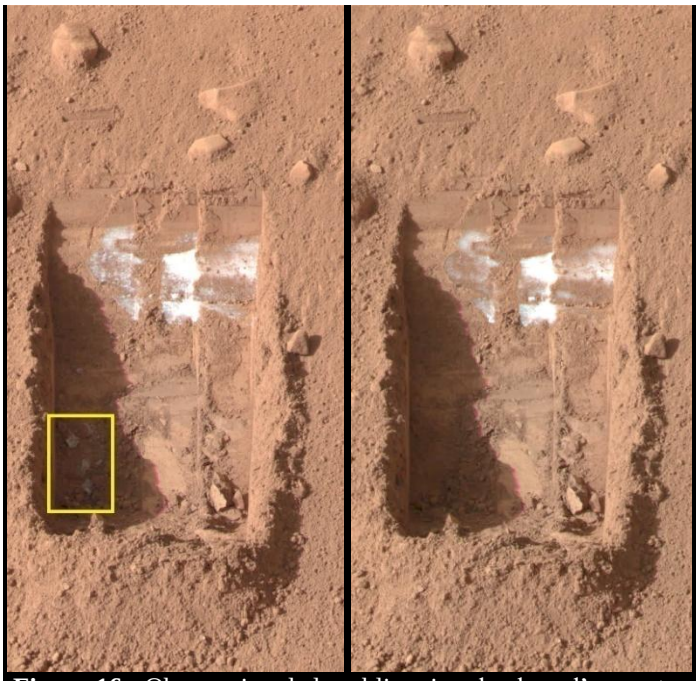


Figure 16 : Observation de la sublimation de glace d'eau entre les Sols 20 et 24 (Crédit : NASA/JPL-Caltech/University of Arizona/Texas A&M University)

Les tranchées « Dodo » et « Goldilocks » située dans un creux polygonal, sont creusés de nouveau entre les Sols 18 et 21 du 13 au 16 juin, où ils sont agrandis et finissent par être fusionnés ensemble. Les deux tranchées forment désormais une tranchée unique plus grande de 35 cm de long sur 22 cm de large par 8 cm de profondeur. Cette nouvelle tranchée a été baptisée pour l'occasion « Dodo-Goldilocks » (Figure 14), et elle présente une très grande concentration de matière blanche localisée au fond de la partie supérieure de la tranchée. Phoenix entame une nouvelle tranchée baptisée « Snow White » (*Blanc comme Neige*) sur le Sol 22 le 17 juin (Figure 14). La tranchée est située à l'extrémité nord-est de la zone de travail du bras robotique, sur le site dénommé « Wonderland » (Pays des merveilles) qui se trouve à l'extrémité sud-est du polygone « Cheshire Cat ». La glace qui affleure la surface est enfouie moins profondément au centre des polygones qu'à leurs extrémités. Un problème de mémoire flash de l'ordinateur de bord au Sol 23 empêche les activités scientifiques, et entraîne la perte des images stockées de la caméra RAC du bras robotique.

Figure 17 : Gros plan sur la lame du godet au Sol 26
(Crédit : NASA/JPL-Caltech/University of Arizona/Max Planck Institute)

La confirmation de la présence de glace d'eau dans la composition de la substance blanche aperçue à l'intérieur des tranchées arrive finalement au Sol 24 (18 juin), par la comparaison des images qui ont été prises à la même heure au Sol 20 et 24 (Figure 16). Les images montrent la disparition des mottes de matière brillante, qui se sont détachées lors du creusement et qui étaient visibles dans la partie inférieure gauche ombrée (cadre jaune) de l'image prise au Sol 20, et qui ont totalement disparu quatre jours plus tard sur l'image suivante prise au Sol 24. Les observations multi spectrales de l'imageur stéréo SSI de la tranchée « Dodo-Goldilocks » indiquent que le matériau brillant est de la glace presque pure, et les images ont également dévoilé certaines variations du matériau brillant dans la partie supérieure des tranchées. Indiquant que la matière blanche est en fait de la glace d'eau qui se sublime lentement au soleil depuis que les tranchées ont été creusées ? La température de solidification de la glace d'eau à la surface de la planète Mars est de –80 °C à une pression atmosphérique situés entre 8,5 et 7,85 millibars en moyenne, et l'ajout de sel ou d'oxydant comme le peroxyde d'hydrogène (H_2O_2) ou le perchlorate (ClO_4^-) qui agit comme un antigel, abaisse davantage cette température de fusion. Le CO_2 commence à se condenser au sol quand les températures descendent en dessous de –130 °C, ce qui arrive seulement durant les hivers martiens.

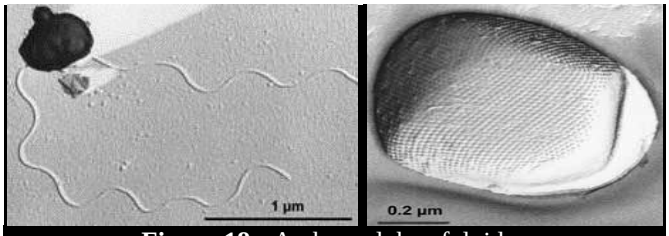


Figure 18 : Archaeoglobus fulgidus
(Crédit : K.O. Stetter & R. Rachel, Regensburg, Germany)

Phoenix creuse une nouvelle tranchée baptisée « Snow White 2 » sur le Sol 24 situé juste à droite de la tranchée « Snow White » (Figure 14), qui sera rebaptisé pour l'occasion « Snow White 1 ». La matière extraite est déposée sur des petits monticules situés au nord des tranchées dans le site dénommé « Croquet Ground ». Le godet a découvert une couche très dure qui se trouve à la même profondeur que dans les autres tranchées creusées précédemment, soit à environ 5 cm de profondeur, et qui semble être composée de glace d'eau très dure. Les portes du four numéro 5 de TEGA reçoivent l'ordre de s'ouvrir sur le Sol 25, mais la quantité de poussière martienne qui se trouve sur la porte l'empêche de s'ouvrir entièrement. L'ouverture de la porte sera de nouveau testée un peu plus tard au cours de la mission (TEGA-5, Rosy Red_Sol72). Au Sol 26 (21 juin), Phoenix récolte un échantillon de poussière martienne dans la petite tranchée « Rosy Red » (*Rose Rouge*) qui vient d'être creusée au nord de la tranchée « Snow White 2 » (Figure 17), puis il livre une partie du contenu au microscope optique de l'expérience MECA, qui entamera alors sa deuxième observation rapprochée de grain de poussière. Quatre jours plus tard, Phoenix assiste à l'arrivée du solstice d'été dans l'hémisphère nord de la planète au Sol 30 (le 25 juin), et livre le même jour le reste de l'échantillon de la tranchée « Rosy Red » dénommé « Rosy Red_Sol25 » contenu dans le godet dans le bécher numéro 0 de l'expérience MECA (WCL-0), qui reçoit pour la première fois des échantillons de sol pour faire des analyses chimiques en milieu humide. Les premiers

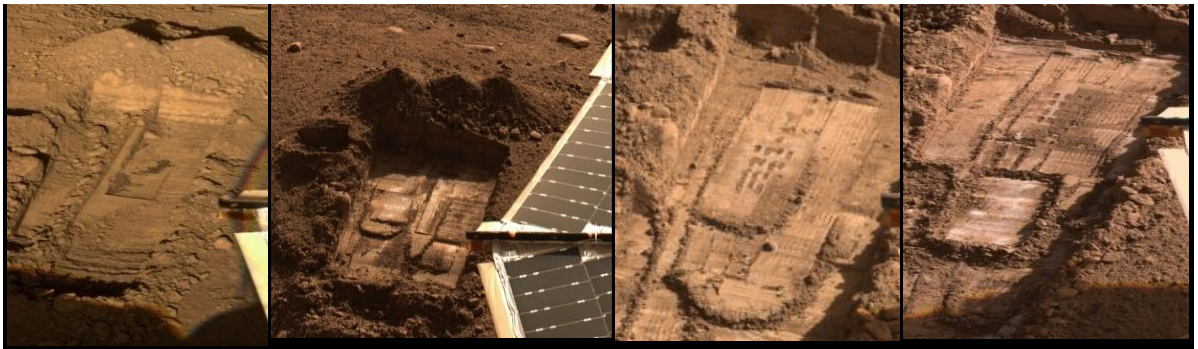


Figure 19 : Snow White au Sol 31, 43, 60 et 113
(Crédit : NASA/JPL-Caltech/University of Arizona/Texas A&M University)

résultats des analyses annoncés un mois plus tard (TEGA-4), soit le 4 août, indiquent que le sol martien est alcalin avec un pH de 8,3 et qu'il contient du magnésium, du sodium, du potassium, du chlorure et des ions perchlorates (ClO_4^-). Les perchlorates sont très solubles dans l'eau et ils sont très peu réactifs dans une atmosphère faiblement tenue dans un milieu aride et glacial comme Mars.

Les perchlorates sont des oxydants relativement inertes et moins réactifs que les superoxydes. Ils sont formés dans un premier temps par la photolyse du rayonnement solaire intense sur les molécules de l'atmosphère martienne et sur la poussière ou les sols riches en chlorure. Les rayons ultraviolets brisent les molécules de gaz carbonique (CO_2) et de vapeur d'eau (H_2O) de l'atmosphère en libérant de l'oxygène, qui va réagir par la suite en oxydant d'autres molécules pour former des radicaux libres. Rendus au sol, les radicaux libres participent à des réactions chimiques d'oxydoréductions sur des molécules contenant du chlore pour former du perchlorate (ClO_4^-). Les perchlorates s'accumulent ensuite à la surface de la planète à cause de leur faible réactivité chimique dans l'environnement nordique froid, sec et aride de la planète Mars, ou comme dans le désert froid, sec et aride d'Atacama au Chili sur la terre.

Les perchlorates sont stables et ne détruisent pas les matières organiques en temps normal. Il existe même des microorganismes extrêmophiles qui utilisent les perchlorates comme source d'énergie ou comme antigel pour résister au grand froid. L'exemple de l'archée hyperthermophile « Archaeoglobus fulgidus »[23] (Figure 18) qui prospère sur terre dans des milieux extrêmes très chauds, comme les évents hydrothermales ou les formations géothermiques et volcaniques, ou règne des températures comprises entre 65 et 95 ^oC. Cet organisme anaérobie, selon des chercheurs de l'université hollandaise de Wageningen et de Delft, aurait la capacité de réduire les sulfates et les perchlorates en émettant un peu de sulfure d'hydrogène (H_2S) et du méthane (CH_4). Nous nous retrouvons donc ici en présence d'un organisme vivant qui pourrait parfaitement illustrer l'évolution et l'existence probable de micro-organisme ayant put s'adapté à l'environnement martien riche en perchlorates et en sulfates. La détection des composés organiques est rendue plus difficile avec le chauffage des échantillons de sol contenant du perchlorate. La chaleur active les perchlorates en libérant de l'oxygène et du chlore, qui peut décomposer entièrement la matière organique avant même leur détection par le spectromètre de TEGA. La libération rapide d'oxygène lors de l'expérience biologique « *Gas Exchange* » des missions Vikings, peut s'expliquer par des réactions chimiques impliquant des perchlorates.

[23] Liebensteiner MG et al, Science (avril 2013) no 340, 85-7

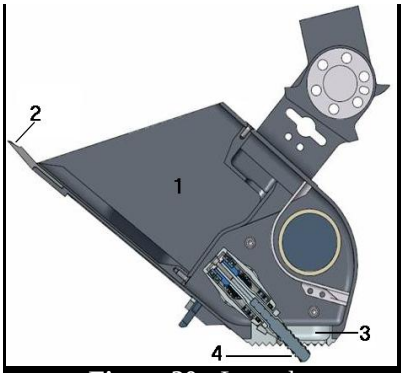


Figure 20 : Le godet
(Crédit : NASA/JPL-Caltech/U.A.)

Les tranchées dénommées « Snow White 1 » et « Snow White 2 » sont élargies et finissent par être fusionnées ensemble entre les Sols 31 et 33 (Figure 19). L'outil de raclage dentelé situé au dos du godet, est utilisé pour la première fois pour gratter plus profondément le fond de la tranchée, qui a été rebaptisée pour l'occasion « Snow White », dans le but de préparer un petit amas d'échantillonnage qui contiendrait un peu de glace d'eau. Les résidus sont ensuite rassemblés en bas de la tranchée, pour former deux petits monticules baptisés « Wicked Witch 1 » et « Wicked Witch 2 » (*Méchante Sorcière 1 et 2*) prêts à être récoltés et livrer rapidement à un four de l'expérience TEGA, avant que la glace d'eau contenue dans l'échantillon ne s'évapore par sublimation. Le godet est équipé de trois petits outils pour l'aider à creuser dans la glace (Figure 20), soit une lame en titane (2) située à l'avant qui permet de gratter et de ramasser les échantillons de sol. Une lame dentelée en carbure de tungstène (3) fixé à l'arrière, qui permet de racler plus profondément le fond des tranchées, et pour finir une petite râpe automatique (4) à grande vitesse fixée à l'arrière du godet, utilisé pour couper et tailler la glace en petits copeaux.

Un échantillon de sol dénommé « Sorceress » est récolté dans la tranchée « « Snow White » au Sol 34, et une petite partie du contenu est livrée au microscope optique au Sol 38 (2 juillet), qui entame alors sa troisième observation rapprochée des grains de poussière martiens. Le reste de l'échantillon contenu dans le godet attend la fin du dernier cycle du mini laboratoire de chimie en phase aqueuse MECA (WCL-0), qui a été entamée sur le Sol 30, avant d'être livré et déversé dans le bécher numéro 1 (WCL-1) trois jours plus tard au Sol 41 (6 juillet). Les résultats de la deuxième expérience de chimie en phase aqueuse ont confirmé la détection de perchlorate réalisé lors de la première expérience sur le Sol 30. La sonde TECP (thermal and electrical conductivity probe) située à l'extrémité du bras de l'atterrisseur est utilisée pour la première fois sur le Sol 43, ou les quatre pointes des aiguilles de 1,5 centimètre sont plantées dans la poussière qui recouvre le sol martien au site « Vestry » (*Sacristie*).

La sonde TECP sert à mesurer la conductivité du sol, sa teneur en eau et ses propriétés thermiques. La tranchée « Runaway » est creusé accidentellement au Sol 47, et le premier panorama couleur de 360° baptisé « Peter Pan » (Figure 21) est délivré le même jour. Il sera retravaillé par la suite pour donner une version polaire du paysage martien centré sur l'atterrisseur Phoenix (Figure 15). Le cliché panoramique est composé d'une mosaïque de 500 images plus petites, qui ont été prises entre les Sols 13 et 47 (du 5 juin jusqu'au 12 juillet 2008) à l'aide de trois filtres de couleur différents. Une seconde version du panorama dénommé « Happily Ever After » (Planche 2) pris avec tous les filtres de couleurs de Phoenix, sera délivré plus tard au cours de la mission sur le Sol 142. La prochaine priorité passe maintenant à la collecte d'échantillon de glace d'eau pour être analysée par l'un des fours de l'expérience TEGA. L'ouverture des portes du four numéro 0 de TEGA (TEGA-0) est commandée sur le Sol 53 (18 juillet), et cette fois-ci les obturateurs ont bien fait leur travail en ouvrant complètement la porte. Le four est finalement prêt à une réception rapide d'échantillon de glace d'eau provenant du petit monticule baptisé « Wicked Witch » (*Méchante Sorcière*), échantillon provenant initialement de la tranchée « Snow White ». Deux jours plus tard, Phoenix participe pour la première fois à une longue campagne d'observation atmosphérique conjointe (SSI et LIDAR) de 24 heures coordonnée avec l'orbiteur MRO sur le Sol 55 le 20 juillet.

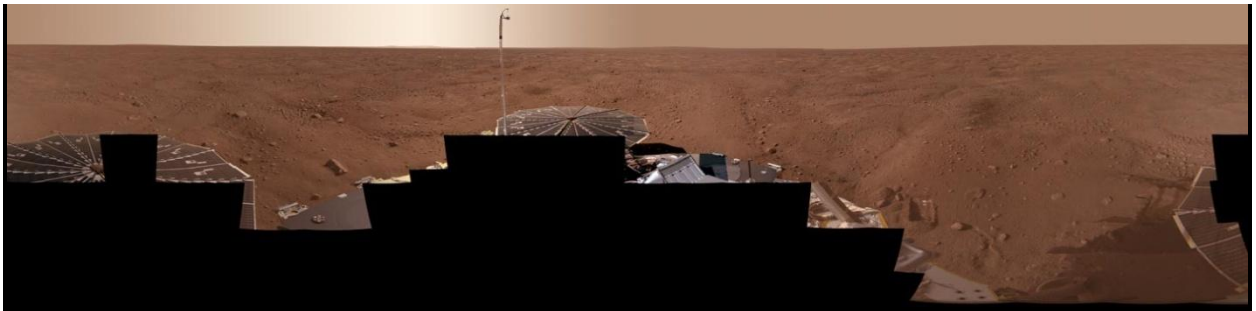
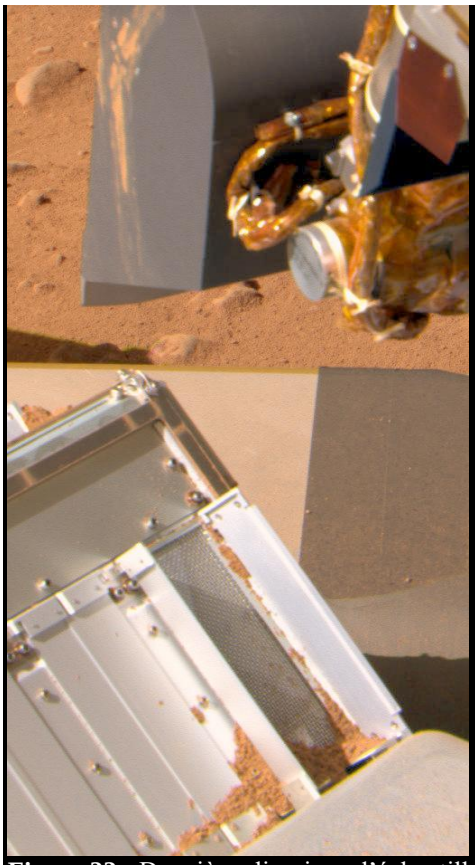


Figure 21 : Peter Pan pris au Sol 47 (Crédit : NASA/JPL-Caltech/U.A./Texas A&M University)



(Credit: NASA/JPL/UA/Texas A & M/color composite by D. Crotty)

Figure 22 : Deuxième livraison d'échantillon à TEGA au Sol 64

Il a fallu trois épreuves d'utilisations de la râpe automatique et de ramassage d'échantillon réalisé aux Sols 50, 53 et 56, avant d'obtenir des clichés de contrôle qui confirmait la présence de la sublimation de la glace d'eau dans le godet. Les procédures d'extractions rapides étant validées (râpage, grattage, ramassage, positionnement du godet au-dessus du four et photo de validation sur le contenu pour voir la sublimation de la glace d'eau). Les opérateurs du godet passent maintenant à l'étape suivante qui est celle de la livraison d'un échantillon glacé au four de l'expérience TEGA (TEGA-0). Après un mois de travail, le four numéro 0 de TEGA reçoit finalement un échantillon dénommé « Glass Slipper » au Sol 64 le 30 juillet (Figure 22), qui contient assez de matière et de glace d'eau pour commencer le processus d'analyse. La livraison d'échantillon au four de TEGA (TEGA-0) avait commencé au Sol 60 et 62, mais il n'avait pas assez de matériel dans le four pour entamer l'expérience de chauffage, la grande partie des poussières étant restées collées au fond du godet. Les premiers résultats d'analyses obtenues un peu plus tard au cours de la mission par le spectromètre de masse de TEGA, ont permis de mesurer pour la première fois la présence de vapeur d'eau à la hauteur de 1 à 2 % au début du troisième cycle de température à 700 °C.

Plusieurs nouvelles tranchées seront creusées durant les deux semaines suivantes (Figure 23). Il s'agit de la partie supérieure et inférieure de la tranchée « Upper Cupboard » (*le Placard*) creusée à partir du Sol 67, qui sera élargie et allongée par la suite aux Sols 79 et 114. La tranchée « Rosy Red 2 » creusée au Sol 72. La tranchée « Never Land » creusée à partir du Sol 68, et qui sera élargie par la suite aux Sols 73 et 78. La tranchée « Stone Soup » (*Soupe de Pierre*) creusée au Sol 74 et élargie par la suite au Sol 76, est située sur la ligne de démarcation de deux polygones de surface au sud des tranchées « Dodo-Goldilocks » et « Upper Cupboard ». Il s'agit de la tranchée la plus profonde creusée par Phoenix sur Mars avec une profondeur de 18 cm. Et pour finir la tranchée « Burn Alive » (*Brulé vivant*) située juste à gauche de la tranchée « Snow White », qui a été creusée accidentellement au Sol 47 est élargie par la suite sur le Sol 75 et de nouveau au Sol 77 le 11 août.

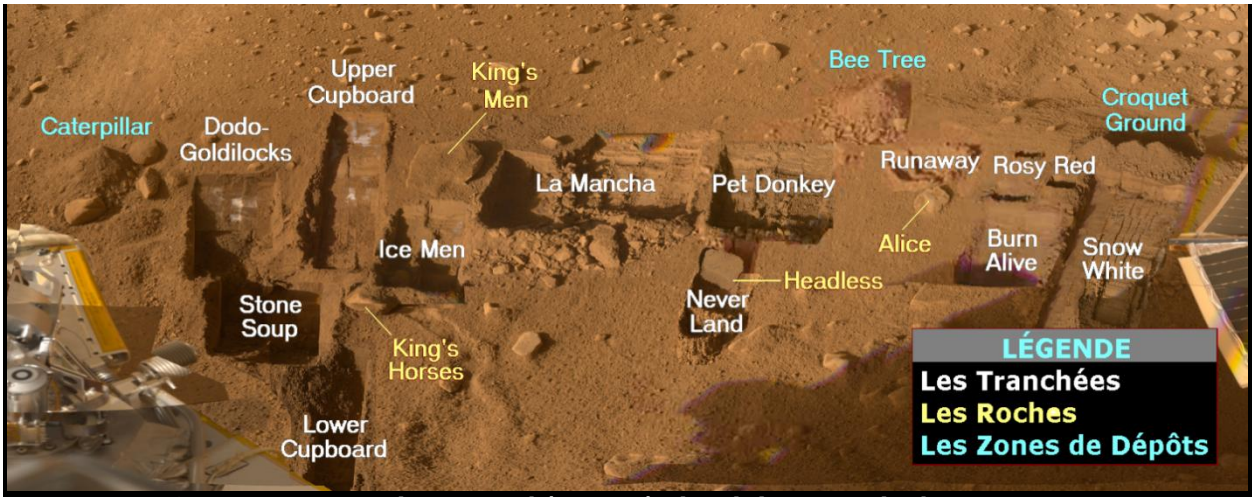


Figure 23 : Montage des 12 Tranchées creusées lors de la mission de Phoenix sur Mars
(Montage à partir des photos de la NASA/JPL-Caltech)

Durant ce temps, un échantillon de sol prélevé sur le site « Rosy Red 2 » (creusé au Sol 62), et qui a été rebaptisé plus la suite « Mother Goose » (*Mère Poule*), a été livré au microscope optique de l'instrument MECA sur le Sol 67. Et un autre échantillon de sol prélevé dans la tranchée « Snow White » au Sol 69 (4 août), a été livré pour la première fois au microscope atomique de l'instrument MECA. Les résultats fournis par le microscope atomique, qui ont été recueillis un peu plus tard au cours de la mission, ont dévoilé des formes tridimensionnelles d'un micromètre d'épaisseur (un millionième de mètre) qui ressemblent beaucoup à celle rencontrée dans la structure des phyllosilicates argileux sur terre (Figure 25). Les argiles se forment en général en milieux humides, lorsque des minéraux basaltiques comme l'olivine et le pyroxène sont mis en présence d'eau. L'observation de la formation du givre sur le sol martien a débuté aux petites heures du matin sur le Sol 71. Et on peut observer sur les clichés pris dans la région sud-est de l'atterrisseur en direction de la roche « Quadlings » (Figure 24), l'accumulation progressive du givre qui fait son apparition pour la première fois sur le Sol 79. Les images de la figure 24 ont été prises sur le Sol 51 (16 juillet), au Sol 79 (14 août) et vers la fin de la mission sur le Sol 151 (27 octobre). L'instrument TEGA a également été mis à contribution pour tenter de valider la découverte de perchlorate réalisée par le mini laboratoire de chimie en phase aqueuse MECA, afin de déterminer sa concentration et ses propriétés. Un échantillon baptisé « Rosy Red_Sol72 » prélevé sur le plancher de la tranchée « Rosy Red 3 » au Sol 72, est finalement livré après la troisième tentative de déversement dans le four numéro 5 de TEGA (TEGA-5) au Sol 74 (9 août). Les échantillons se déversent mieux et ils semblent coller moins aux parois, étant plus

Figure 24 : Observation de la formation du givre aux Sols 51, 79 et 151
(Crédit : NASA/JPL-Caltech/University of Arizona/Texas A&M University)

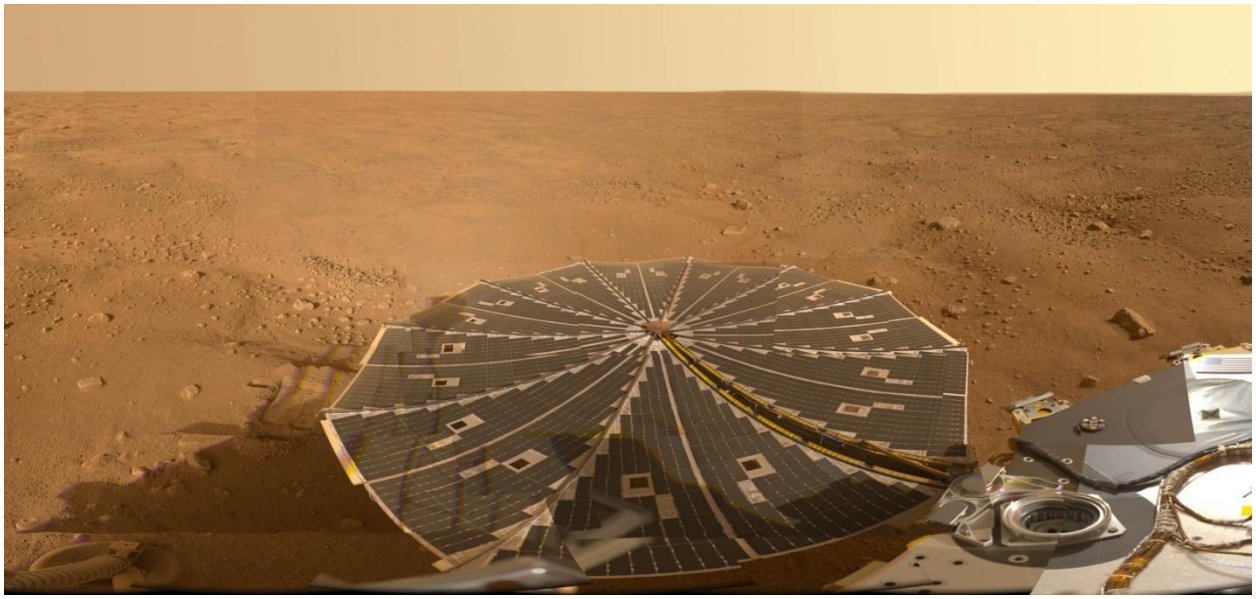


Planche 2 : Panorama Happily Ever After (Crédit : NASA/JPL-Caltech/University of Arizona/Texas A&M/color by Mark Lemmon)

secs après êtres passés quelques jours dans le godet.

Un échantillon de sol martien provenant du monticule baptisé « Wicked Witch 2 » (*Méchante Sorcière 2*), prélevé au Sol 74 sur le plancher de la tranchée « Snow White », est livré au microscope optique de l'instrument MECA au Sol 75. L'ouverture des portes du four numéro 7 de TEGA (TEGA-7) est commandée sur le Sol 79, afin qu'il soit prêt à recevoir une semaine plus tard au Sol 85 (20 août) l'échantillon baptisé « Burning Coals » (*Incendie des Charbons*) provenant du plancher de la tranchée « Burn Alive ». Il s'agit d'un échantillon qui a été récolté à une profondeur intermédiaire, entre l'échantillon de surface « Rosy Red 3 » et l'échantillon de la couche de glace « Wicked Witch ». L'échantillon du four numéro 7 de TEGA complète ainsi le profil d'analyse verticale situé au niveau des trois couches de poussière et de glace qui recouvrent le sol martien autour du site d'atterrissage. Le premier coucher de soleil derrière l'horizon se

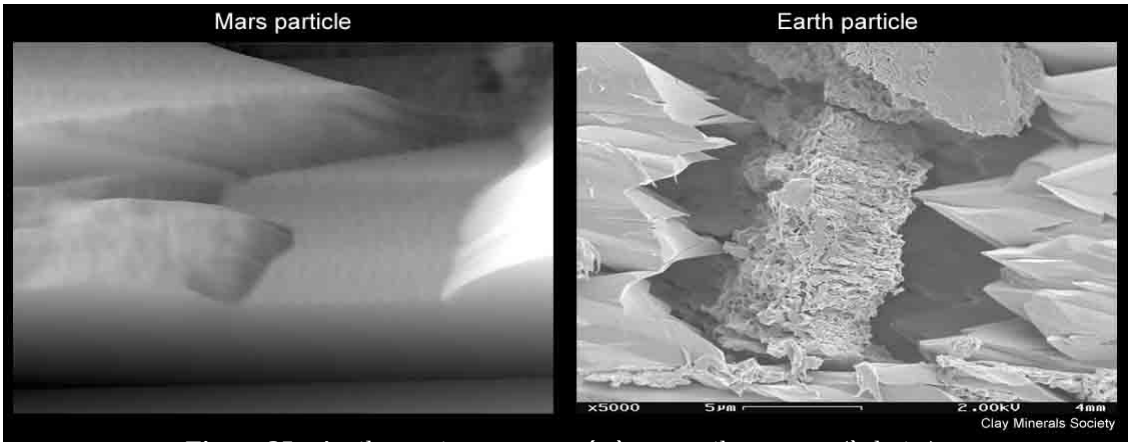


Figure 25 : Argile martienne comparée à une argile terrestre (à droite).
(Crédit image de gauche : NASA/JPL-Caltech/University of Arizona/University of Neuchatel/Imperial College London. Et l'image de droite : courtesy of Michael Velbel (Michigan State University) and William Barker, (University of Wisconsin-Madison))

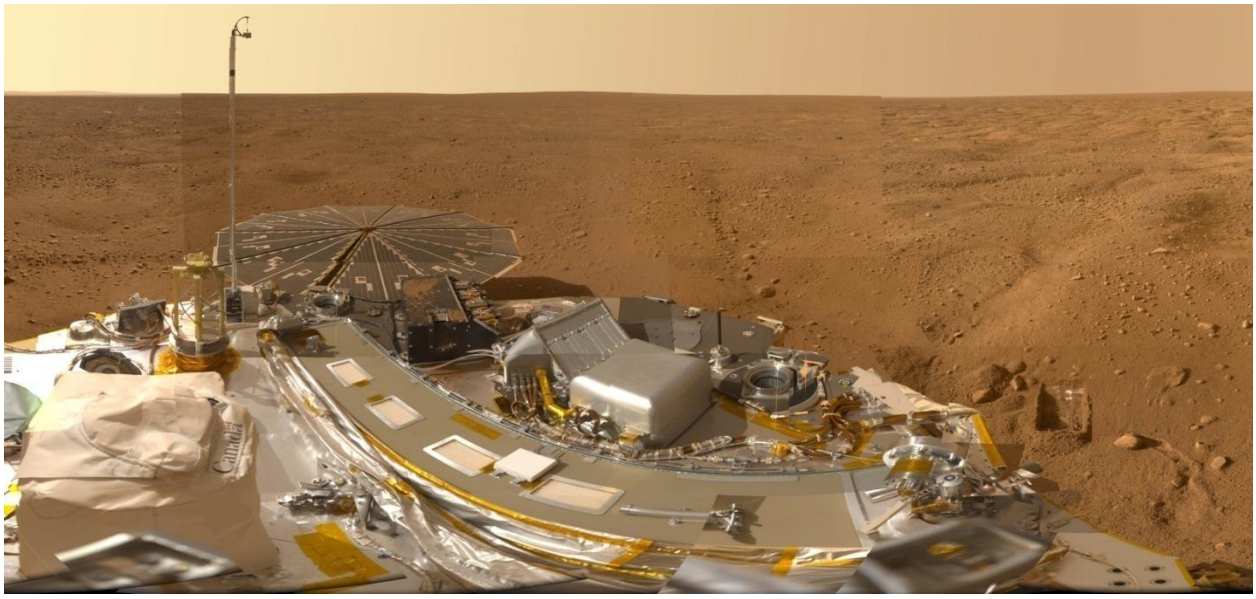


Planche 2 : Suite du Panorama Happily Ever After

produit sur le Sol 86 (21 août), avec une courte nuit qui n'a duré qu'une petite demi-heure seulement. La mission de l'atterrisseur Phoenix franchit une nouvelle étape le 26 août 2008 sur le Sol 91, en dépassant la durée de vie nominale de 90 jours qui avait été initialement prévue pour la mission de l'atterrisseur à la surface de la planète Mars. Les différentes expériences effectuées jusqu'à maintenant par les instruments scientifiques de la plate-forme d'atterrissage, ont permis d'identifier la présence de magnésium, de sodium, de potassium, de chlorure, de sel de perchlorate et de glace d'eau. Les données scientifiques recueillies jusqu'à maintenant ont grandement permis de mieux comprendre l'histoire du cycle de la glace d'eau dans les régions polaires boréales de la planète, et de mieux délimiter les indices reliés au potentiel d'habitabilité du sol martien de cette région.

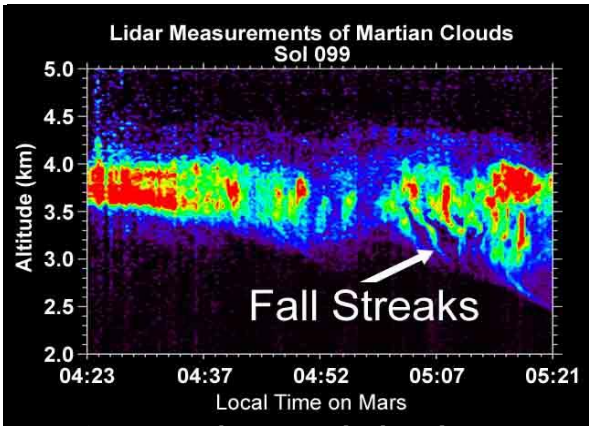


Figure 26 : Observation de chute de neige (Crédit : NASA/JPL-Caltech/University of Arizona/Canadian Space Agency)

Le mini laboratoire de météorologie canadienne LIDAR a surpris pour la première fois des chutes de neige au-dessus du site d'atterrissage au Sol 99 le 3 septembre (Figure 26). Des nuages de type cirrus se forment durant la nuit sur Mars à une altitude comprise entre 4 et 4,5 km. Des flocons de neige formés à l'intérieur des nuages tombent en oblique poussés par les vents, jusqu'à une altitude comprise entre 2,5 et 3 km. Les flocons et les cristaux de glaces réchauffés par le soleil durant leurs chutes se subliment par la suite avant même d'atteindre la surface. Un échantillon de sol provenant de la tranchée « Dodo-Goldilocks » baptisée « Golden Key » (*Clé d'Or*) est livré le même jour au microscope optique de l'instrument MECA. La troisième expérience de chimie en phase aqueuse est préparée au Sol 96, avec la livraison dans le bécher numéro 3 du mini laboratoire MECA (MECA-3) de l'échantillon baptisé « Golden Goose 2 » (*l'Oie d'Or 2*), qui a été récolté sur le plancher de la plus profonde des tranchées « Stone

Soup » au Sol 95 le 31 août. Mais l'échantillon refuse de tomber à l'intérieur de l'instrument et s'empile sur le tamis de l'entonnoir. Une deuxième tentative d'alimentation est effectuée sur le Sol 102 (7 septembre) avec l'échantillon « Golden Goose 3 » (*l'Oie D'or 3*), mais l'échantillon refuse toujours de tomber à l'intérieur de l'instrument. La poussière récoltée dans la plus profonde des tranchées creusées par Phoenix sur la planète Mars, semble plus compacte et cohésive que tous les autres échantillons qui ont été récoltés depuis le début de la mission, et le bécher numéro 3 de l'instrument MECA restera vide jusqu'à la fin de la mission.

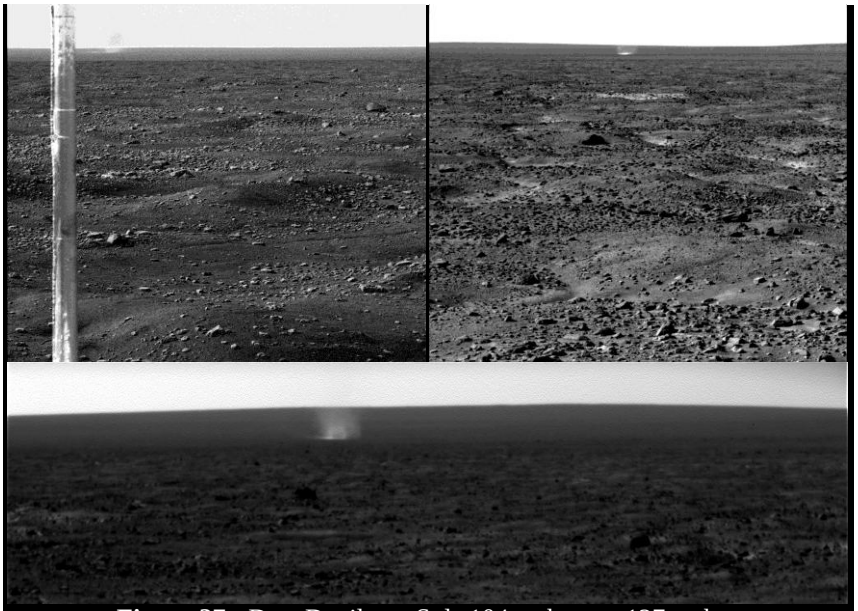


Figure 27 : Dust Devil aux Sols 104 en haut et 127 en bas
(Crédit : NASA/JPL-Caltech/University of Arizona/Texas A&M University)

Phoenix observe pour la première fois des tourbillons de poussières (Figure 27), aussi dénommée Dust Devils, de 2 à 5 mètres de diamètre sur le Sol 104 le 8 septembre à 11h16 (heure locale de Mars), qui se déplaçaient vers l'ouest à une vitesse moyenne estimée entre 5 et 7 mètres par seconde, et situés à environ 400 et 700 mètres de distance sur l'horizon ouest-sud-ouest de la plate-forme d'atterrissage. Cette découverte effectuée le lendemain après l'analyse d'une séquence de 29 images de l'horizon pris à la mi-journée par la caméra stéréoscopique. Six tourbillons de poussières évoluant sur le sol martien ont été observés ce jour là, dont certaines apparaissaient sur plusieurs images. Phoenix aura l'occasion d'observer d'autres Dust Devils aux Sols 108, 117, 127 et 138 de sa mission. Au cours de la mission un total de 37 tornades de poussières a été trouvé dans les images entre les Sols 104 et 138. La capture des tornades de poussière et de leurs déplacements dans le paysage martien est rendue possible grâce à une suite d'images prises dans un intervalle de 50 secondes.

Le lendemain sur le Sol 105, un échantillon du monticule « Sorceress 2 » (*Sorcière 2*) est récolté au fond de la tranchée « Snow White », puis livré deux jours plus tard au Sol 107 (12 septembre) au bécher numéro 2 du mini laboratoire de chimie humide MECA (MECA-2). Il s'agit de la dernière livraison effectuée au mini laboratoire de chimie humide MECA, dont les résultats recueillis plus tard au cours de la mission ont été comparables à ceux obtenus dans les expériences de chimies humides précédentes. La NASA annonce officiellement la détection de carbonate de calcium ($CaCO_3$) à la hauteur de 3 à 5 % au Sol 125 le 29 septembre 2008. Les

expériences ont été réalisées par le four numéro 0 de TEGA (TEGA-0), et confirmé par la suite par le bécher numéro 1 du mini laboratoire de chimie humide de MECA (MECA-1) avec un échantillon récolté sur le même site au Sol 41 (Figure 29).

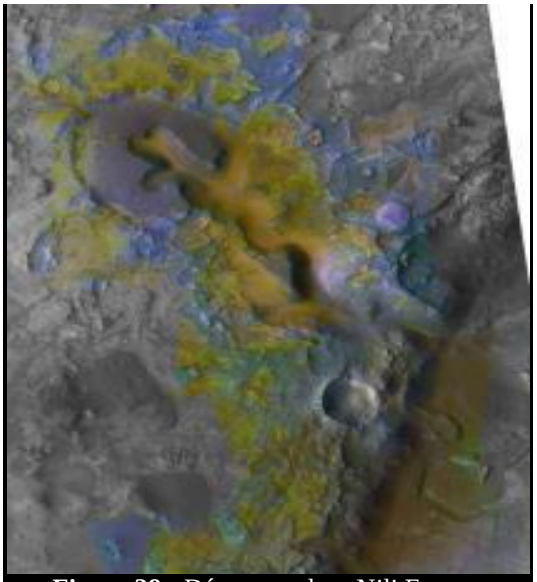


Figure 28 : Découvert dans Nili Fossae, d'olivines (jaune), d'argiles riches en smectites (bleue) et de carbonates (vert) (Crédit : NASA/ JPL/JHUAPL/MSSS/ Brown University)

L'observation par TEGA (TEGA-0) a été obtenue sur la base de la libération du dioxyde de carbone contenue dans l'échantillon du sol martien, à la température connue de la dissociation du carbonate de calcium à 700 °C. La preuve de l'instrument MECA (MECA-1) vient de l'effet tampon, qui a été évalué à partir de l'analyse chimique de l'évolution de la concentration du calcium mesurée dans la solution en milieu acide. Les carbonates de calcium sont de bons indicateurs sur les épisodes géologiques passés de l'action réciproque entre l'eau et le gaz carbonique de l'atmosphère de la planète. Les carbonates se forment en milieu humide neutre ou alcalin, lorsque l'eau et le dioxyde de carbone rentrent en contactent et interagissent avec des silicates calciques d'origines basaltiques et volcaniques composées de calcium, de fer ou de magnésium, comme les minéraux à base d'olivine, de pyroxènes et de plagioclases. L'altération des roches basaltiques par l'eau peut également donner des phyllosilicates argileux. Les milieux plus acides ont plutôt tendance à détruire et à dissoudre facilement les carbonates de calcium contenus dans les roches.

La découverte des carbonates sur Mars réalisée par l'atterrisseur Phoenix en septembre 2008, et par le rover Spirit en janvier 2004 et en décembre 2005 (annoncée le 3 juin 2010). Va être confirmé quelques mois plus tard par le spectromètre infrarouge CRISM (Compact Reconnaissance Imaging Spectrometer for Mars) de MRO, lors de la découverte en décembre 2008 d'un dépôt de carbonate situé dans une zone de 20 km de large dans les couches rocheuses de « Nili Fossae » (Figure 28). Il s'agit d'une région située au nord-ouest du vaste bassin d'impact « Isidis », composé d'un réseau de fossés d'effondrement âgés d'environ 3,6 milliards d'années. La couche sédimentaire de carbonate trouvé à cet endroit datant de l'époque du Noachien/Phyllosien, est un signe indubitable de la présence de l'eau dans le passé de la planète. Cette couche de carbonate aurait été exposée plus récemment à la suite de l'érosion du sol, ou lors de la formation de certains cratères d'impacts situés à proximité. La présence de carbonate à côté d'argile et d'olivine dans la même couche stratigraphique, dévoilée par l'image de MRO, suggère très fortement que les carbonates de cette région ont été formés à partir de l'altération de l'olivine par une eau au pH relativement neutre. Il s'agit d'une époque très différente de celle qui a suivi, et qui est reliée à un milieu plus sec et acide associé à la découverte des dépôts de sulfate (Hespérien/Theiikien).

À l'approche de l'automne martien, la décision fut prise de remplir le plus vite possible les quatre derniers fours de l'instrument TEGA, avant que l'alimentation électrique soit rendue trop faible par un soleil qui descend de plus en plus bas sur l'horizon. La recharge des batteries est de plus en plus longue et de moins en moins efficace en septembre 2008, qu'au tout début de la mission sur Mars. La manipulation du bras robotique de Phoenix est très coûteuse en énergie,

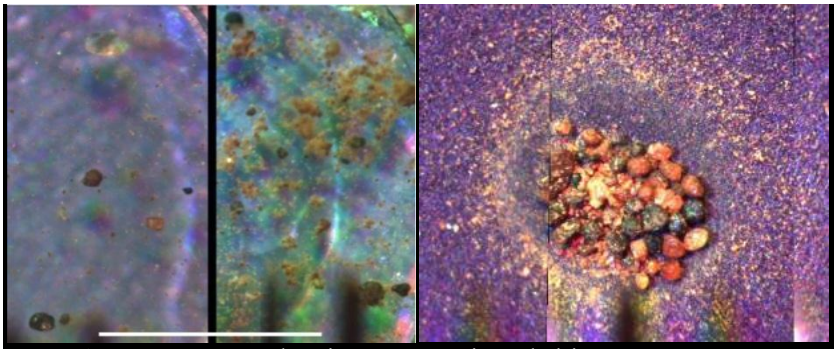


Figure 29 : Image du microscope optique de l'instrument MECA
(Crédit : NASA/JPL-Caltech/University of Arizona/Texas A&M University)

tandis que les expériences menées à bord de l'atterrisseur dans les différents laboratoires est moins coûteuses, et peuvent attendre d'être menées un peu plus tard au cours de la mission. L'énergie fournie pour la recharge des batteries continues de descendre de jour en jour, passant de 3 300 watts/heure au début de la mission à moins de 2 100 watts/heure au Sol 120. Alors que l'automne s'approche à grands pas dans les plaines nordiques de Mars, l'atterrisseur profite des derniers jours de l'été pour prélever le maximum d'échantillons avant l'arrivée de l'équinoxe d'automne qui doit se produire le 26 décembre 2008.

Le microscope optique de MECA reçoit l'échantillon « Golden Goose » (*l'Oie D'or*) sur le Sol 110, et le four numéro 3 de TEGA **(**TEGA-3**)** est alimenté au Sol 113 (18 septembre), mais les portes de ce dernier sont restées fermées. Le four numéro 1 **(**TEGA-1**)** reçoit l'échantillon « Sam McGee » au Sol 120 provenant de la tranchée « Snow White », suivi d'un nouvel échantillon provenant du monticule « Wicked Witch 2 » au Sol 126 (2 octobre). Mais après plusieurs essai pour remplir le four numéro 1 de TEGA, ce dernier reste vide et les dernières tentatives ont tousses échouées, puis les portes du four sont fermées au Sol 130. Entre temps, les tranchées « La Mancha » et « Pet Donkey » sont ouvertes sur le Sol 127 et 128. La tranchée « Pet Donkey » se trouve à l'emplacement où se trouvait la roche « Headless » (*Sans Tête*) d'environ 19 cm de long sur 10 cm de large, avant que celle-ci soit déplacée plus au sud sur environ 40 cm dix jours plus tôt, et ceci afin de préparer la récolte d'un échantillon de sol situé à l'abri des radiations solaire sous la roche. Et la tranchée « La Mancha », située entre les tranchées « Upper Cupboard » et « Never Land » (Figure 23), a été ouverte pour sonder la profondeur du plancher de glace qui se trouve à cet endroit. Le microscope optique et atomique de l'instrument de microscopie MECA reçoit l'échantillon baptisé « Galloping Hessian » au Sol 128 en provenance de sous la roche « Headless », qui se trouve au sud de la tranchée « Pet Donkey » et qui semble contenir une forte teneur en sel.

L'atterrisseur essuie sa première tempête de poussières entre les Sols 135 et 136, et la fine couche de poussière qui recouvre désormais les panneaux solaires réduit quelque peu le pouvoir de recharge des batteries. Le four numéro 6 de TEGA **(**TEGA-6**)** à l'honneur de recevoir la dernière livraison d'un échantillon de sol martien (« Rosy Red-Sol136 ») sur le Sol 136 (12 octobre), après une première tentative qui a échouée au Sol 130 (« Rosy Red-Sol 130 ») prélevé pour l'occasion dans la tranchée « Rosy Red 3 ». Tandis que le four numéro 2 **(**TEGA-2**)** restera vide par manque de temps. La dernière tranchée à être creusée sur le sol martien par Phoenix a été « Ice Man » (*Roi de l'homme*) sur le Sol 145 (21 octobre). La tranchée a été creusée au sud de la roche qui porte le même nom entre les tranchées « La Mancha » à droite et « Upper

Cupboard » à gauche. Une deuxième tentative pour remplis le four numéro 3 de TEGA **(**TEGA-3**)** a également échoué au Sol 151, les portes ne s'ouvrent pas. Phoenix exécute son dernier jour d'activité scientifique sur le Sol 152 (28 octobre), avant de devenir une simple station de météo martienne.

Le soleil ne fournit plus assez d'énergie pour que les panneaux solaires puissent recueillir assez d'électricité pour maintenir chargées les batteries. Après avoir coupé les systèmes de chauffage du bras robotisé, de l'expérience TEGA, du système d'initiation pyrotechnique, de la caméra stéréoscopique et de la station météorologique pour économiser le plus possible de l'énergie. Phœnix passe sous un seuil d'énergie critique dès le lendemain au Sol 153 (29 octobre), et bascule dans le mode de sécurité Lazarus jusqu'au Sol 157 (2 novembre), durant lequel il coupe toutes les activités non essentielles. En attendant des jours meilleurs, Phœnix va se réveiller que durant deux heures par jour pour écouter et pour tenter de rentrer automatiquement en communication avec les sondes martiennes qui passent au-dessus de lui. Les nuits commencent à être de plus en plus longues et froides sur le site d'atterrissage, avec des températures qui oscillent entre les –45 °C le jour à –96 °C la nuit, et un soleil qui descend de plus en plus bas sur l'horizon avec des nuits de 4 heures de pleine noirceur. Bientôt, la nuit s'installera pour quelques mois dans les régions polaires boréales de la planète, avec des températures hivernales pouvant descendre jusqu'à –150 °C la nuit. Le 2 novembre 2008 sur le Sol 157, la sonde Phœnix s'est tue définitivement et a cessé toute communication avec la Terre. Phoenix aura transmis plus de 25 000 images de son site d'atterrissage, creusées 12 tranchées, livrés 31 échantillons aux instruments, en plus de durer deux mois de plus de ce qui avait été initialement prévu.

La sonde Phœnix a été photographiée pour la dernière fois sur son site d'atterrissage par l'orbiteur MRO le 7 mai 2010, dans le cadre d'une dernière tentative pour entrer en communication avec la sonde au sol après le passage de l'hiver martien. Les images qui ont été prises entre 2008 et 2010 par MRO, semblent indiquer que les panneaux solaires se sont brisés, et qu'ils ont cédé par la suite sous le poids de l'accumulation de la neige carbonique (Figure 30). La sonde semble avoir fortement souffert lord de l'hiver martien de 2008-2009.

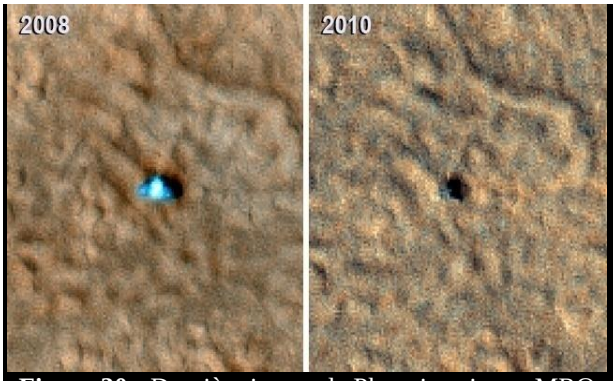


Figure 30 : Dernière image de Phoenix pris par MRO (Crédit : NASA/JPL-Caltech/University of Arizona)

Résumé des expériences TEGA et MECA					
Instrument	Sol	Date	Tranchée	Nom de l'échantillon	Type d'échantillon
MECA WCL-0	30	25 juin	Rosy Red	Rosy Red_Sol25	Sol meuble au-dessus du sol cimenté par la glace au centre du polygone, 1 cm de profondeur
MECA WCL-1	41	6 juillet	Snow White	Sorceress	Sol gratté du sol cimenté par la glace au centre du polygone, 5 cm de profondeur
MECA WCL-3	96	1 septembre	Stone Soup	Golden Goose2	Sol meuble et meuble dans la zone du creux polygonal, 15 cm de profondeur
MECA WCL-2	107	12 septembre	Snow White	Sorceress2	Sol gratté du sol cimenté par la glace au centre du polygone, 5 cm de profondeur
TEGA-4	12	7 juin	Goldilocks	Baby Bear	Sol de surface meuble au-dessus de glace presque pure, 1 cm de profondeur
TEGA-0	64	30 juillet	Snow White	Glass Slipper	Échantillon prélevé sur un sol cimenté par la glace au centre du polygone, à 5 cm de profondeur
TEGA-5	72	9 août	Rosy Red3	Rosy Red_Sol72	Sol meuble à la surface à partir du centre du polygone, 1 cm de profondeur
TEGA-7	85	20 août	Burn Alive	Burning Coals	Échantillon à mi-profondeur dans un sol meuble au-dessus d'un sol cimenté par la glace au centre du polygone, profondeur 3 à 4 cm
TEGA-1	130	6 octobre	n/a	n/a	Aucun échantillon dans le four, analyse à blanc
TEGA-6	136	12 octobre	Rosy Red3	Rosy Red_Sol136	Sol meuble à la surface à partir du centre du polygone, 1 cm de profondeur
TEGA-3	151	27 octobre	n/a	n/a	Aucun échantillon dans le four, analyse à blanc
Voir note de bas de page numéro 16 et 17					

Pour aller plus loin:

- AGU: First Results From The Phoenix Mission to Mars updated: 18 March 2018
https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/toc/10.1002/(ISSN)2169-9100.PHOENIX2

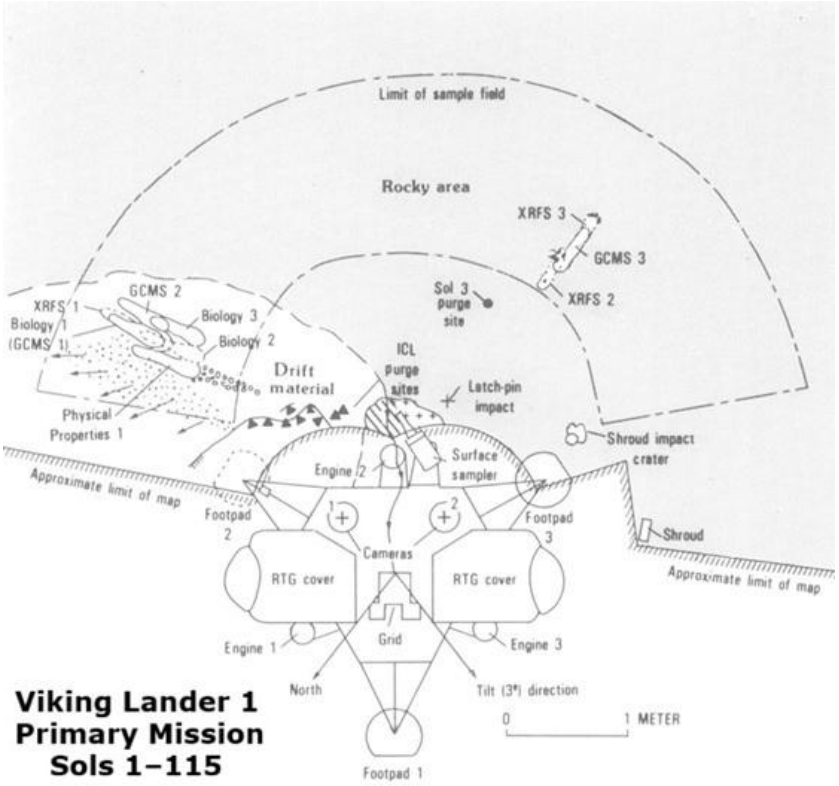
ANNEXE

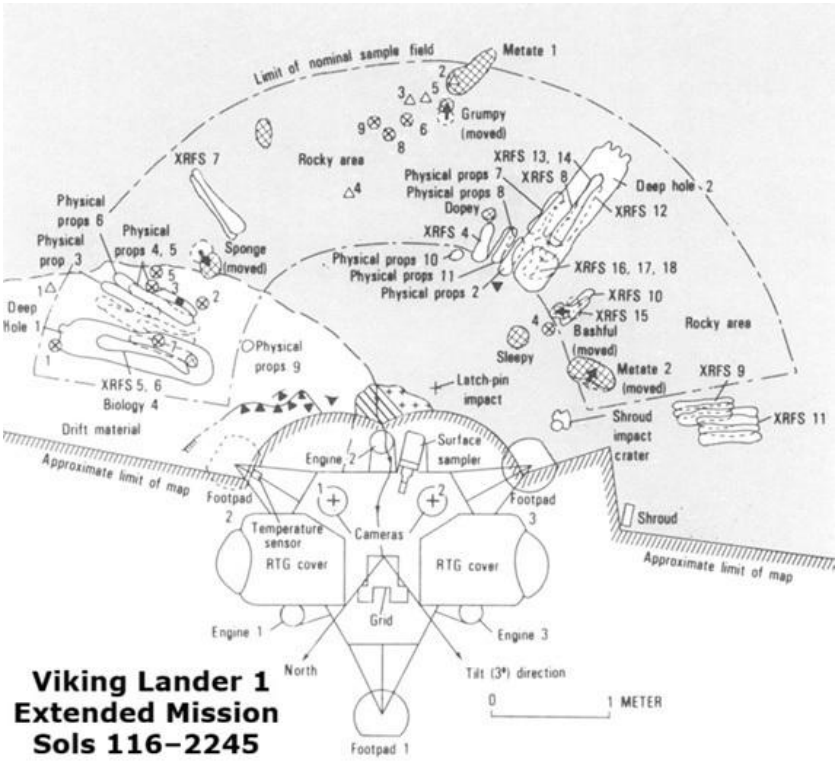
Expérience de biologie des Vikings									
Étape	**Viking 1 Cycles**				**Viking 2 Cycles**				
	1	**2**	**3**	**4**	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**
Labeled Release (LR) (Injection d'élément nutritif marqué au ^{14}C) L'expérience visait à détecter la vie hétérotrophe (consommatrice de matière organique) par radio respirométrie. Métabolisme microbien hétérotrophe marquées au carbone radioactif (^{14}C)									
Collecte (cible)	Sol 8 Sandy Flats	Sol 8 Sandy Flats	Sol 36 Sandy Flats	Sol 91 Sandy Flats	Sol 8 Beta	Sol 37 Beta	Sol 51 Notch Rock	Sol 145 Beta	Sol 145 Beta
Première Injection	Sol 10 Actif	Sol 29 Control (160^0C)	Sol 39 Actif	Sol 230 Actif Mission étendue	Sol 11 Actif	Sol 37 Control (50^0C)	Sol 53 Actif	Sol 147 Control (46^0C) Mission étendue	Sol 229 Actif Mission étendue
Deuxième Injection	Sol 17	Sol 35	Sol 55	Sol 232	Sol 18	Sol 38	Sol 60	Sol 161	
Troisième Injection			Sol 80						
Purge	Sol 23	Sol 37	Sol 89	Sol 250	Sol 24	Sol 47	Sol 140	Sol 170	Sol 260 Fin du cycle sans purger
Commentaire		Échantillon utilisé, stocké dans la trémie de biologie pendant 20 sols	Incubation prolongée avec trois injections	Deep Hole. Échantillon récolté au Sol 14 et conservé dans la trémie de biologie pendant environ 140 sols	La température de surface lors de l'acquisition était d'environ -23 °C	Stérilisation à froid	Pour vérifier l'exposition aux ultraviolets. Échantillon prélevé sous Notch Rock (-66 °C) longue incubation	Stérilisation à froid	Échantillon stocké dans la trémie de biologie ; analyse effectuée dans la chambre de test utilisée.
Résultat	Large entre les Sols 1-14	Faible sur 9 Sols	Deux larges paliers aux valeurs élevées, Sols 1-50	Peu élevée	Large aux valeurs élevées Sol 3-16	Faible sur 3 Sols	Faible sur 5 Sols	Légère hausse a partir du Sol 15 après injection	Peu élevées sur 4 Sols
Gas Exchange (GEX) Consommation/production de biogaz et rechercher la présence de vie microbienne sans marquage radioactif. Mode Mouillé : le sol martien est mélangé directement avec un milieu de culture composé de nutriment organique liquide. Mode Humide : Le sol est exposé uniquement à de la vapeur d'eau.									
Collecte (cible)	Sol 8 Sandy Flats	Sol 29 Bonneville	Sol 34 Badger déplacé	Sol 250 Sandy Flats (Deep Hole 1)	Sol 8 Beta	Sol 37 Beta	Sol 45 Notch Rock	Sol 471 Snow white	Rock 4 Pousser au Sol 302 Rock 5 Sol 369 Rock 6 Sol 376
Première	Sol 9 Humide Durée 7 Sols (O)	Mouillé Durée 39 sols	Mouillé Durée 35 Sols	Mouillé Durée 103 Sols	Humide Durée 7 Sols		Mouillé Durée 78 Sols	Humide Durée 4 Sols	
Deuxième	Sol 16 Mouiller Durée 16 Sols (C)				Mouillé Durée 19 Sols		Mouillé Durée 16 Sols		
Troisième	Sec échantillon stocké pendant 139 jours dans la cale de l'atterrisseur, et chauffé				Mouillé Durée 12 Sols		Mouillé Durée 22 Sols		
Pyrolytic Release (PR) (CO et CO_2 marqués au ^{14}C) (GCMS) Expérience d'assimilation du carbone radioactif avec absence d'eau et de nutriments organiques. Fixation autotrophe du carbone (photosynthèse). Après 120 heures d'incubation sous une lumière artificielle (une lampe à arc au xénon), la chambre contenant le sol a été chauffée à environ 625 °C. (Palier de température : 120^0C, 200^0C, 350^0C et 500^0C)									
Collecte (cible)	Sol 8 Sandy Flats	Sol 31 Sandy Flats	Sol 36 Sandy Flats	Sol 91 Sandy Flats	Sol 8 Beta	Sol 37 Beta	Sol 51 Notch Rock	Sol 145 Beta	
Commentaire	Lampe allumée, à sec	Lampe allumée, à sec, stérilisation à 175°C	Lampe allumée, à sec	Cycle 4 : Lampe allumée, à sec, et mouillage (pour le cycle 6) Cycle 5 : Lampe allumée, mouillage, stérilisation à 90 °C	Obscurité, à sec	Lampe allumée, mouillage	Obscurité, à sec	?	
Résultats	Assimilation de carbone, la	Echantillon stocké dans la	Assimilation de carbone plus	Cycle 4 : Assimilation de	Assimilation de carbone		Négatif, ce qui est étrange étant	Un incident technique avec	

	plus forte enregistrée.	trémie pendant 19 sols. Négatif, activité réduite	faible que C1	carbone, valeur identique à C5 & C6 Cycle 5 : Echantillon stocké dans la trémie pendant 69 sols. Assimilation de carbone, valeur identique à C4 & C6 Cycle 6 : Echantillon stocké dans la trémie pendant 139 sols (entre 5 et 24°C). Assimilation de carbone, valeur identique à C4 & C5			donné que le sol prélevé sous le rocher Notch était protégé de l'irradiation solaire	une valve a empêché les mesures	

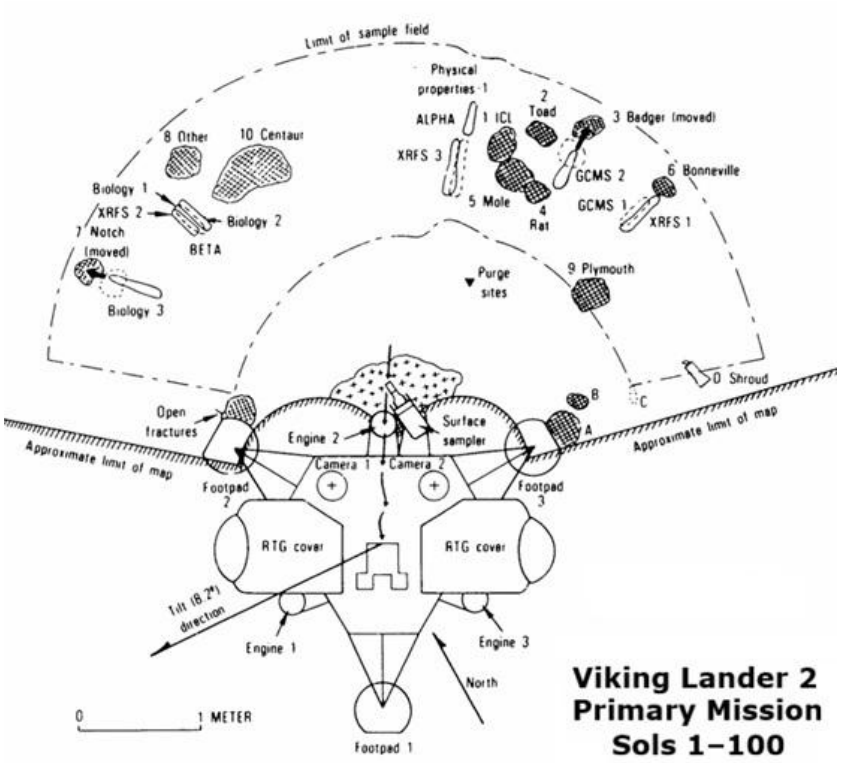
L'instrument de biologie a effectué un total de 21 cycles d'analyse sur les deux atterrisseurs.

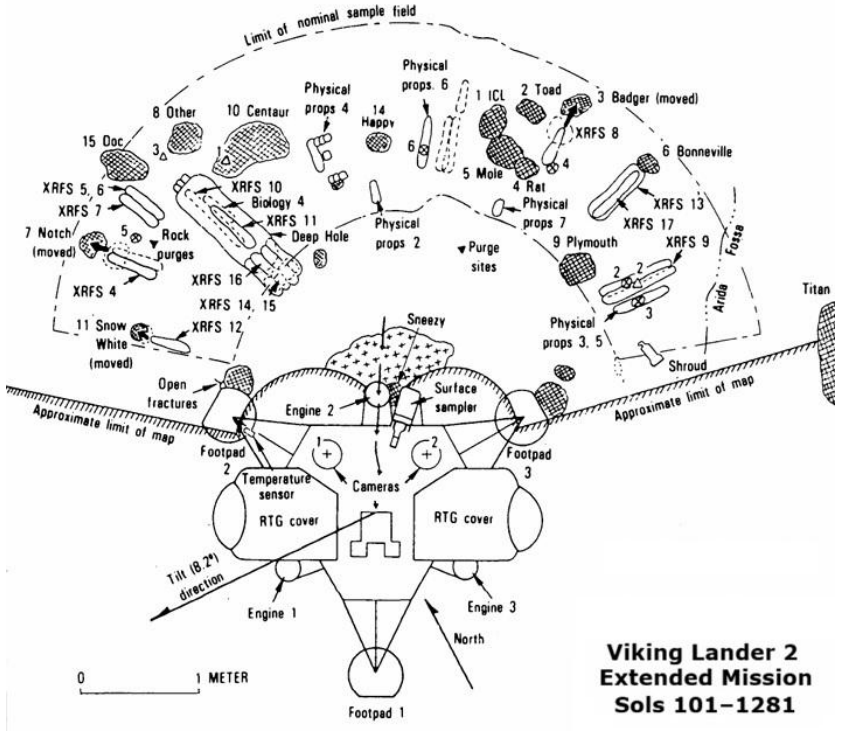
- Viking Lander Labeled Release Experienter's Notebook
https://pds-geosciences.wustl.edu/missions/vlander/lr.html
Labeled Release : https://pds-geosciences.wustl.edu/viking/vl1_vl2-m-lr-2-edr-v1/vl_9010/extras/
- Gilbert V. Levin, former NASA scientist and engineer, PI for the Labeled Release experiment.
https://www.gillevin.com/mars-research.html
The Viking Biological Investigation: Preliminary Results Science, 194, 4260, 99-105 (1976)
https://www.gillevin.com/pdf/the-viking-biological-investigation-preliminary-results.pdf
- Vance Oyama (1922-1998), former NASA Ames biologist and PI for the Gas Exchange experiment.
- Norman Horowitz (1915-2005), former head of the Biology Division at NASA's Jet Propulsion Laboratories, Principal Investigator (PI) for the Pyrolytic Release experiment.
- Klaus Biemann, Professor Emeritus of chemistry at the Massachusetts Institute of Technology and PI for the Gas Chromatograph-Mass Spectrometer.
- Nirgal : La Quête des Vikings, de Philippe Labrot
http://www.nirgal.net/life.html
Résultats de l'expérience Pyrolitic des atterrisseurs Viking
https://www.nirgal.net/popup/viking_pyrolitic_release.html
Résultats de l'expérience Gas Exchange des atterrisseurs Viking
https://www.nirgal.net/popup/viking_gas_exchange.html
Résultats de l'expérience Labeled Release des atterrisseurs Viking
https://www.nirgal.net/popup/viking_labeled_release.html
- The Viking Biological Investigation: Preliminary Results, Klein, H.P. et al., Science, 194, 4260, 99-105, October 1976
https://gillevin.com/pdf/the-viking-biological-investigation-preliminary-results.pdf





- Physical Properties of the surface materials at the Viking Landing Sites on Mars, By H.J. MOORE, R.E. HUTTON, G.D. CLOW, and C.R. SPITZER 1987 http://pubs.usgs.gov/pp/1389/report.pdf

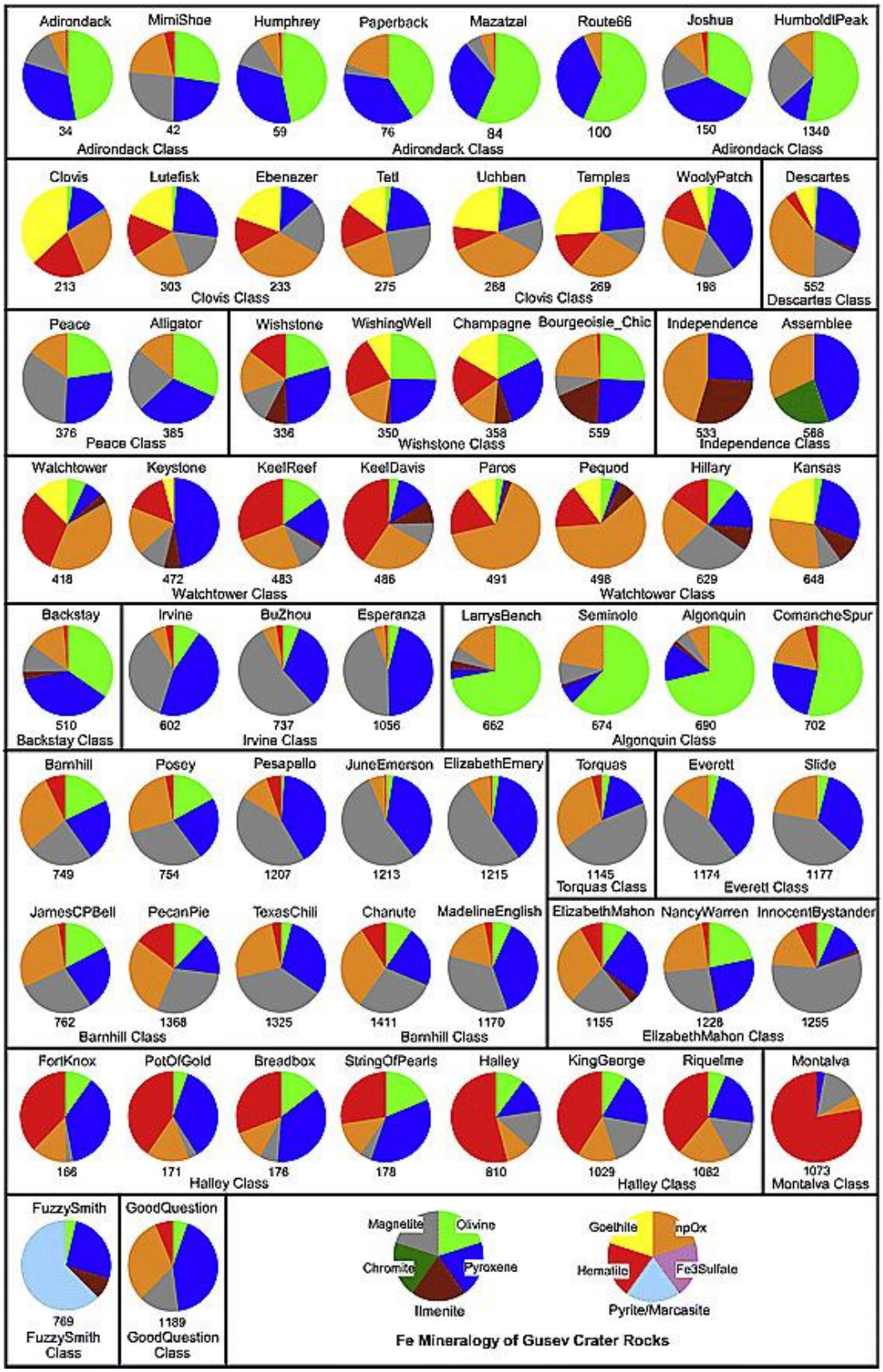




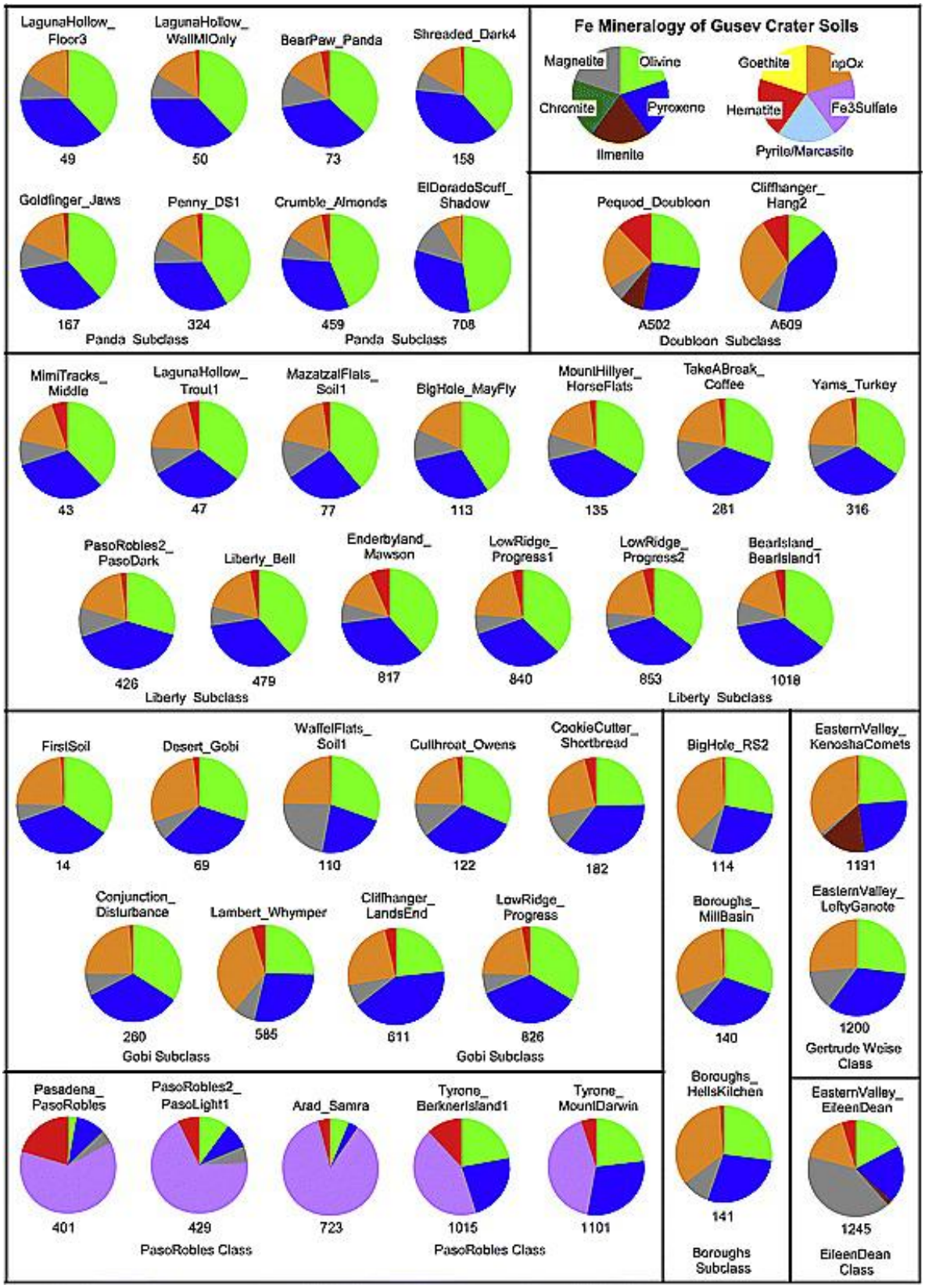
- Physical Properties of the surface materials at the Viking Landing Sites on Mars, By H.J. MOORE, R.E. HUTTON, G.D. CLOW, and C.R. SPITZER 1987 http://pubs.usgs.gov/pp/1389/report.pdf

Liste des Brossages et Abrasions du Rover Spirit						
	Sol	**Date**	**Activité**	**Zone d'Échantillonnage**	**Cible**	**Étape**
1	30	03-02-2004	brossage	Adirondack	Prospect	En route vers le Cratère Bonneville (Sol 1-156)
2	33	06-02-2004	brossage		Prospect	
3	34	07-02-2004	abrasion		Prospect	
4	55	29-02-2004	brossage	Humphrey		
5	58	03-03-2004	abrasion		Heyworth1	
6	59	03-03-2004	abrasion		Heyworth1	
7	79	24-03-2004	brossage	Mazatzal	Illinois/New York	
8	81	27-03-2004	abrasion		New York	
9	83	29-03-2004	abrasion		Brooklyn	
10	86	01-04-2004	brossage		Missouri	
11	99	13-04-2004	brossage	Route 66	(Mosaïque)	De Bonneville à West-Spur (Sol 1-156)
12	169	24-06-2004	brossage	Pot of Gold		De West-Spur au Sommet (Sol 156 à 634)
13	195	21-07-2004	abrasion	Wooly-Patch	Sabre	
14	198	24-07-2004	abrasion		Mastodon	
15	214	10-08-2004	brossage	Clovis	Plano	
16	216	12-08-2004	abrasion		Plano	
17	225	21-08-2004	brossage		Kiva (Mosaïque)	
18	230	26-08-2004	brossage	Ebenezer		
19	231	27-08-2004	abrasion		Cratchit 2	
20	236	01-09-2004	brossage		(Mosaïque)	
21	285	21-10-2004	abrasion	Uchben	Koolik	
22	290	26-10-2004	brossage		Chiikbes	
23	298	03-11-2004	brossage	Lutefisk		
24	299	04-11-2004	brossage			
25	333	10-12-2004	brossage	Wishstone		
26	334	11-12-2004	abrasion		Chisel	
27	354	31-12-2004	brossage	Champagne	Bubbles	
28	355	02-01-2005	abrasion		Bubbles	
29	373	20-01-2005	brossage	Peace		
30	374	21-01-2005	abrasion		Justice	
31	377	24-01-2005	abrasion		Justice	
32	385	04-02-2005	brossage	Alligator		
33	415	04-03-2005	brossage	Watchtower		
34	416	05-03-2005	abrasion		Joker	
35	429	18-03-2005	brossage	Paso Roles	Paso Roles 2	
36	470	01-05-2005	brossage	Methuselah	Keystone	
37	475	06-05-2005	brossage		Pittsburgh	
38	484	15-05-2005	brossage	Jibsheet	Davis	
39	496	27-05-2005	brossage	Larry's Outcrop	Ahab	
40	509	09-06-2005	brossage	Backstay		
41	529	01-07-2005	brossage	Independence	Franklin	
42	553	24-07-2004	brossage	Discourse		
43	646	27-10-2005	brossage	Kansas	Kestrel	Du Sommet à Home Plate (Sol 635 à 746)
44	660	10-11-2005	brossage	Larry's Bench		
45	672	23-11-2005	brossage	Seminole	Osceola	
46	675	26-11-2005	brossage		Abiaka	
47	687	08-12-2005	brossage	Algonquin	Iroquet	
48	699	20-12-2005	brossage	Comanche Spur	Horseback	
49	700	21-12-2005	brossage		Palomino	

50	753	15-02-2006	brossage	Posey			L'épopée de Home Plate (Sol 747 à 2210)
51	761	23-02-2006	brossage	Cool_Papa_Bell	Stars		
52	763	25-02-2006	brossage		Crawfords		
53	830	04-05-2006	brossage	Progress	Progress1		
54	845	19-05-2006	brossage		Progress2		
55	866	09-06-2006	brossage		Progress3		
56	1031	26-11-2006	brossage	King_George_Island			
57	1070	06-01-2007	brossage	Troll	Montalva		
58	1085	21-01-2007	brossage		Montalva Daisy		
59	1143	22-03-2007	brossage	Torquas	Torquas2		
60	1176	24-04-2007	brossage	Slide			
61	1205	25-05-2007	brossage	Pesapallo			
62	1209	29-05-2007	brossage	Superpesis			
63	1211	01-06-2007	brossage	June Emerson			
64	1216	05-06-2007	brossage	Elisabeth Emery			
65	1217	06-06-2007	brossage		Jane Stoll		
66	1218	07-06-2007	brossage		Midred Deegan		
67	1219	08-06-2007	brossage		Betty Wagoner's Daughter		
68	1226	15-06-2007	brossage	Nancy Warren	(sol)		
69	1326	25-09-2007	brossage	Texas Chili			
70	1341	10-10-2007	brossage	Humboldt Peak			
71	1368	06-11-2007	brossage	Pecan Pie			
72	1427	07-01-2008	brossage	Chanute			
73	1450	30-01-2008	brossage	Freeman			
74	1479	02-03-2008	brossage	Wendell Pruitt			
75	1484	07-03-2008	brossage				
76	1965	12-07-2009	brossage	Troy	Cyclops Eye3		
77	1973	20-07-2009	brossage		Cyclops Eye4		
78	1981	28-07-2009	brossage		Polyphemus Eye		
79	1990	06-08-2009	brossage		Cyclops Eye5		
80	1995	11-08-2009	brossage		Polyphemus Eye2		
81	2006	22-08-2009	brossage	Ulysses	Spear		
82	2016	01-09-2009	brossage		Olive Leaf		



Diagrammes circulaires pour la composition minéralogique en fer des cibles de brossages et d'abrasions examinés par le spectromètre Mössbauer de Spirit
https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1029/2008JE003201



Diagrammes circulaires pour la composition minéralogique en fer des échantillons de sols examinés par le spectromètre Mössbauer de Spirit
https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1029/2008JE003201

Liste des Brossages et Abrasions du Rover Opportunity						
	Sol	**Date**	**Activité**	**Zone d'Échantillonnage**	**Cible**	**Étape**
1	30	24-02-2004	abrasion	El Capitan	McKittrick/Middle	Cratère Eagle (Sol 1 à 57)
2	34	28-02-2004	abrasion		Guadalupe/King3	
3	44	09-03-2004	abrasion	Flat Rock	Mojo2	
4	45	10-03-2004	brossage		Mojo2	
5	48	13-03-2004	brossage	Berry Bowl		
6	55	20-03-2004	brossage	(Dans une tranchée)	(sol)	
7	66	01-04-2004	abrasion	Bounce Rock	Case	En route vers Endurance (Sol 58 à 320)
8	86	21-04-2004	abrasion	Pilbara	Golf	
9	107	13-05-2004	brossage	Lion Stone	Puma	
10	138	13-06-2004	abrasion	Karatepe (Entrée dans le cratère Endurance)	Tennessee/Volt	
11	143	18-06-2004	abrasion		Kentucky/Cobble Hill	
12	145	20-06-2004	abrasion		Layer-C/Virginia	
13	148	23-06-2004	abrasion		Layer-D/London	
14	151	26-06-2004	abrasion		Manitoba/Grindstone	
15	153	28-06-2004	abrasion		Manitoba/Kettlestone	
16	161	06-07-2004	abrasion		Millstone/Drammensfjorden	
17	177	24-07-2004	abrasion	Diamond Jenness	Holman_3	
18	178	25-07-2004	abrasion		Holman_3	
19	182	29-07-2004	abrasion	Mackenzie	Campbell_2	
20	186	04-08-2004	abrasion	Inuvik	Tuktoyuktuk_2	
21	194	12-08-2004	abrasion	Axel Heiberg	Bylot	
22	214	01-09-2004	brossage	Escher	EmilNolde2	
23	217	04-09-2004	brossage		Otto Dix	
24	218	05-09-2004	abrasion		Kirchner	
25	236	23-09-2004	abrasion	Auk	(sol)	
26	305	02-12-2004	brossage	Black Cow (Vers la sortie du cratère Endurance)	Paikea	
27	306	03-12-2004	abrasion		Paikea	
28	307	04-12-2004	abrasion		Wharenhui	
29	311	08-12-2004	abrasion		Wharenhui	
30	349	19-01-2005	brossage	Heat Shield Rock	Squidward	De Endurance à Victoria (Sol 321 à 952)
31	401	10-03-2005	brossage	Yuri	Gagarin	
32	402	11-03-2005	abrasion		Gagarin	
33	544	04-08-2005	brossage	Ice_Cream	OneScoop	
34	545	05-08-2005	abrasion		OneScoop	
35	556	16-08-2005	brossage	Fruit Basquet	LemonRind	
36	558	18-08-2005	abrasion		Strawberry	
37	560	20-08-2005	abrasion		LemonRind	
38	593	23-09-2005	brossage	South Shetland	Elephant/Penguin	
39	633	04-11-2005	abrasion	Olympia	Kalavrita	
40	638	09-11-2005	brossage		Ziakas	
41	680	02-01-2006	brossage		Rimrock/Ted	
42	691	13-01-2006	abrasion		Rimrock/Ted	
43	791	14-04-2006	brossage	Rawhide	Buffalo Springs	
44	804	29-04-2006	brossage	Brookville		
45	818	12-05-2006	brossage	Cheyenne		
46	893	30-07-2006	abrasion	Beltra		
47	961	08-10-2006	brossage	Fogo	Cha	L'épopée autour de Victoria (Sol 953 à 1683)
48	962	09-10-2006	abrasion		Cha	
49	1035	22-12-2006	brossage	Rio de Janeiro		
50	1166	06-04-2006	brossage	Viva La Rata		

51	1168	08-05-2006	abrasion				
52	1178	18-05-2006	brossage	Cercedilla	Penota		
53	1180	20-05-2006	abrasion		Penota		
54	1182	22-05-2006	abrasion		Penota		
55	1313	04-10-2007	brossage	Duck Bay (Entrée du cratère Victoria)	Steno		
56	1316	07-10-2007	abrasion		Steno		
57	1341	02-11-2007	abrasion		Smith/Smith_1		
58	1348	09-11-2007	brossage		Smith/Smith_1		
59	1370	01-12-2007	abrasion		Smith/Smith_2		
60	1387	18-12-2007	abrasion		Lyell/Lyell_1		
61	1388	19-12-2007	abrasion		Lyell/Lyell_1		
62	1429	30-01-2008	abrasion		Buckland		
63	1475	18-03-2008	abrasion		Gilbert/Gilbert_RAT		
64	1833	21-03-2009	brossage	Cook Islands	Penrhyn		De Victoria à Endeavour (Sol 1683 à 2681)
65	1838	26-03-2009	abrasion		Penrhyn		
66	1941	10-07-2009	brossage	Absecon			
67	2070	20-11-2009	brossage	Marquette Island	Peck Bay		
68	2075	25-11-2009	brossage		Islington Bay		
69	2100	20-12-2009	abrasion		Peck Bay2		
70	2103	23-12-2009	abrasion		Peck Bay2		
71	2116	05-01-2010	brossage		Peck Bay2		
72	2485	20-01-2011	brossage	Santa Maria	Luis de Torres		
73	2513	18-02-2011	abrasion		Luis de Torres		
74	2717	15-09-2011	brossage	Chester Lake	Salisbury1		Cape York (Sol 2681 à 3316)
75	2726	25-09-2011	brossage		Salisbury1		
76	2729	28-09-2011	brossage		Salisbury1		
77	2801	11-12-2011	brossage	Boesmanskop			
78	2995	27-06-2012	brossage	Grasberg	Grasberg1		
79	2998	30-06-2012	abrasion		Grasberg1		
80	3001	03-07-2012	brossage		Grasberg1		
81	3067	09-09-2012	brossage	Kirkwood (Matijevic)			
82	3076	18-09-2012	brossage	Whitewater Lake (Matijevic Hill)	Azilda1		
83	3078	20-09-2012	brossage		Azilda2		
84	3080	22-09-2012	brossage		Azilda3		
85	3083	25-09-2012	abrasion		Azilda2		
86	3085	28-09-2012	abrasion		Azilda2		
87	3087	30-09-2012	brossage		Azilda2		
88	3094	07-10-2012	brossage	Chelmsford (Matijevic Hill)	Chelmsford2		
89	3096	09-10-2012	brossage		Chelmsford3		
90	3144	27-11-2012	brossage	Copper Cliff (Matijevic Hill)	Sandcherry		
91	3146	29-11-2012	brossage		Sandcherry		
92	3209	02-02-2013	brossage	Flack Lake (Matijevic)	Fullerton 3		
93	3214	07-02-2013	brossage	Fecunis Lake (Matijevic)			
94	3224	17-02-2013	brossage	Maley (Matijevic)			
95	3251	17-03-2013	abrasion	*Kirkwood (Matijevic Hill)	Sturgeon River 3		
96	3253	19-03-2013	abrasion		Sturgeon River 3a		
97	3301	07-05-2013	abrasion	Esperance (Matijevic Hill)	Esperance5		
98	3305	11-05-2013	abrasion		Esperance5		
99	3382	30-07-2013	abrasion	Black Shoulder	Sol 3376-3384		Vers Solander Point (Sol 3316 à 3507)
100	3403	20-08-2013	brossage	Platypus			
101	3434	21-09-2013	brossage	Wally Wombat	Sol 3432-3437		
102	3444	01-10-2013	brossage	Callitris	Sol 3441-3448		
103	3461	19-10-2013	brossage	Kangaroo Paw	Spinifex Sol 3461-3466		
104	3541	09-01-2014	brossage	Cape Elizabeth	Sol 3540-3544		Cape Tribulation

				(Pinnacle Island)			(Sol 3508 à 3911)
105	3569	07-02-2014	brossage	Green Island			
106	3598	09-03-2014	brossage	Turnagain Arm			
107	3671	23-05-2014	brossage	Sarcobatus Flat	Sol 3671-3677		
108	3795	27-09-2014	brossage	Hoover	Sol 3793-3797		
109	3812	14-10-2014	brossage	Lipscomb	Margaret		
110	3850	23-11-2014	brossage	Cottondale	Calera Sol 3850-3853		
111	3854	27-11-2014	brossage	Sol 3850-3868	Locust Fork Sol 3854-3868		
112	3950	05-05-2015	brossage	Sgt Charles Floyd	Sol 3948-3954		Marathon Valley (Sol 3912 à 4485)
113	3970	26-03-2015	brossage	Athens			
114	3975	31-03-2015	brossage	Thessaloniki	Sol 3971-3979		
115	4023	19-05-2015	brossage	Donald A Hall	Sol 4020-4029		
116	4064	30-06-2015	brossage	Ryan NYP	Sol 4061-4065		
117	4091	28-07-2015	brossage	Pvt Reubin Field	Pvt Reubin Field2		
118	4107	14-08-2015	brossage	Pvt Robert Frazer	Pvt Robert Frazer3		
119	4111	18-08-2015	abrasion	Sol 4098-4125	Pvt Robert Frazer3		
120	4114	21-08-2015	abrasion		Pvt Robert Frazer3		
121	4120	27-08-2015	brossage		Pvt Robert Frazer6		
122	4219	07-12-2015	brossage	Pvt Hugh McNear	Sol 4211-4221		
123	4234	22-12-2015	brossage	Pvt John Potts	Pvt John Potts2		
124	4244	01-01-2016	abrasion	Sol 4230-4260	Pvt John Potts		
125	4255	13-01-2016	abrasion		Pvt John Potts		
126	4257	15-01-2016	abrasion		Pvt John Potts		
127	4259	17-01-2016	brossage		Pvt John Potts		
128	4357	26-04-2016	brossage	Pierre Pinaut	Pierre Pinaut3		
129	4363	03-05-2016	abrasion	Sol 4350-4375	Pierre Pinaut3		
130	4370	10-05-2016	brossage		Pierre Pinaut3		
131	4373	13-05-2016	brossage		Pierre Pinaut3		
132	4412	22-06-2016	brossage	York	Sol 4411-4415		
133	4700	14-04-2017	brossage	Ogallala			Vers Cape Byron (Sol 4486 à 5111)
134	4704	18-04-2017	abrasion	Sol 4700-4705			
135	5026	14-03-2018	brossage	Aguas Calientes			
136	5027	15-03-2018	abrasion	Sol 5023-5038			

Sol et Date pour Chaque Kilomètre				
	Spirit		Opportunity	
km	Sol	Date	Sol	Date
1	108	26-04-2004	102	07-05-2004
2	125	10-05-2004	325	23-12-2004
3	147	01-06-2004	393	02-03-2005
4	363	11-01-2005	408	18-03-2005
5	635	16-10-2005	428	07-04-2005
6	715	05-01-2006	605	05-10-2005
7	1123	02-03-2007	774	01-03-2006
8			849	14-06-2006
9			917	23-08-2006
10			1080	06-02-2007
11			1194	02-06-2007
12			1666	25-09-2008
13			1693	28-10-2008
14			1782	27-01-2009
15			1825	12-03-2009
16			1892	22-04-2009
17			1952	21-07-2009
18			2034	13-01-2009
19			2124	14-01-2010
20			2191	24-03-2010
21			2272	15-06-2010
22			2322	05-08-2010
23			2355	08-09-2010
24			2393	17-10-2010
25			2420	14-11-2010
26			2443	13-12-2010
27			2552	29-03-2011
28			2567	19-04-2011
29			2592	10-05-2011
30			2614	02-06-2011
31			2630	18-06-2011
32			2654	12-07-2011
33			2670	29-07-2011
34			2754	23-10-2011
35			3056	08-08-2012
36			3314	20-05-2013
37			3348	25-06-2013
38			3385	01-08-2013
39			3639	19-04-2014
40			3728	20-07-2014
41			3837	09-11-2014
42			3926	08-02-2015
43			4443	23-07-2016
44			4636	07-02-2017
45			4874	09-10-2017

Séance de Roulement Quotidien de 100 Mètres et Plus (Couleur : Regroupement Mensuel et record pour chaque rover)							
	Spirit			Opportunity			
	Sol	Mètre	Date	Sol	Mètre	Date	
1	125	123.7	10-05-2004	82	140.9	17-04-2004	
2	133	113.1	18-05-2004	360	153	28-01-2005	
3	134	109.5	19-05-2004	362	156.4	31-01-2005	
4				378	?	15-02-2005	
5				383	177.51	20-02-2005	
6				384	?	21-02-2005	
7				396	123.9	05-03-2005	
8				406	183.04	16-03-2005	
9				407	160.3	17-03-2005	
10				408	190.28	18-03-2005	
11			1 415.81	410	219.89	20-03-2005	
12				412	180.5	22-03-2005	
13				413	174.7	23-03-2005	
14				414	183.2	24-03-2005	
15				433	150.6	13-04-2008	
16				1663	151.1	27-09-2008	
17				1666	129.3	30-09-2008	
18				1673	135.4	08-10-2008	
19				1686	130.9	21-10-2008	
20				1687	127.0	22-10-2008	
21			814,99	1691	216.19	26-10-2008	
22				1693	105.4	28-10-2008	
23				1695	?	30-10-2008	
24				1737	?	12-12-2008	
25				1796	122.1	11-02-2009	
26				1797	110.4	12-02-2009	
27				1864	119.6	22-04-2009	
28				2353	110.3	06-09-2010	
29				2355	102.7	08-09-2010	
30				2358	105.4	11-09-2010	
31				2394	100.5	18-10-2010	
32				2395	100.3	19-10-2010	
33				2401	121.8	25-10-2010	
34				2403	127	27-10-2010	
35				2420	107.7	14-11-2010	
36				2424	129.4	18-11-2010	
37				2436	100.5	30-11-2010	
38				2438	102.4	02-12-2010	
39				2441	139.3	05-12-2010	
40			707,8	2442	124,1	06-12-2010	
41				2444	100.3	08-12-2010	
42				2447	141.7	11-12-2010	
43				2449	?	14-12-2010	
44				2554	118.5	01-04-2011	
45				2556	129.5	03-04-2011	
46				2560	136.3	07-04-2011	
47				2562	111.8	09-04-2011	
48			1 118,9	2569	100.2	16-04-2011	
49				2572	119.6	19-04-2011	
50				2576	133.9	23-04-2011	

51				2579	152.8	26-04-2011	
52				2583	116.3	30-04-2011	
53				2588	126.0	06-05-2011	
54				2589	128.8	07-05-2011	
55				2592	124.9	10-05-2011	
56			872,4	2593	116.6	11-05-2011	
57				2596	139.4	14-05-2011	
58				2600	108.2	18-05-2011	
59				2603	128.5	21-05-2011	
60				2614	144.4	02-06-2011	
61				2616	165.67	03-06-2011	
62				2623	161.7	11-06-2011	
63			1 031,67	2626	132.8	14-06-2011	
64				2629	145.6	17-06-2011	
65				2630	144.2	18-06-2011	
66				2635	137.3	23-06-2011	
67				2645	160.5	03-07-2011	
68				2649	140.4	08-07-2011	
69				2652	149.4	11-07-2011	
70				2658	123.9	17-07-2011	
71			1 191,6	2660	118.9	19-07-2011	
72				2661	128.5	20-07-2011	
73				2663	108,3	22-07-2011	
74				2664	142.9	23-07-2011	
75				2668	118.8	27-07-2011	
76				2674	117.3	02-08-2011	
77				2676	116.6	04-08-2011	
78				3351	119.7	28-06-2013	
79				3355	117.8	02-07-2013	
80				3385	114.7	02-08-2013	
81				3728	100.3	20-07-2014	
82				3839	110.5	11-11-2014	
83				4705	131.4	18-04-2017	

Record absolu de distance parcourus sur un seul sol : Opportunity 410 et Spirit 125

	Vers Endurance		Vers Victoria		Victoria		Vers Santa Maria		Vers Endeavour		Solander Point		Cape Tribulation		Cape Byron

Sols 0-494 https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1002/2014JE004622
Sols 535-634 https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1002/2016JE005200
Midnight Planets http://www.midnightplanets.com/contents.html
Mars Exploration Rover Opportunity End of Mission Report :
https://trs.jpl.nasa.gov/bitstream/handle/2014/47103/CL%2319-7647.pdf
Mars Exploration Rover Spirit End of Mission Report :
https://ntrs.nasa.gov/api/citations/20160001767/downloads/20160001767.pdf
Where is Curiosity? https://science.nasa.gov/mission/msl-curiosity/location-map/

Conjonction Solaire					
	Spirit			Opportunity	
	Date	Sol	Lieu	Sol	Lieu
1	10 au 22 sept 2004	244-256	Winter Haven : Tikal	223-237	Endurance : Ellesmere
2	16 au 30 juin 2006	991-1005	Winter Haven 2	970-984	Victoria : Cape Verde
3	30 nov au 15 déc 2008	1746-1760	Winter Haven 3	1725-1740	Santorini
4	28 janv au 12 fév 2011			2493-2508	Sant Maria : Luis de Torres
5	9 au 26 avril 2013			3273-3291	Cape York : Esperance
6	3 au 25 juin 2015			4037-4058	Spirit of St. Louis : Private William Bratton
7	22 juil au 1er août 2017			4793-4808	Perseverance : Parral

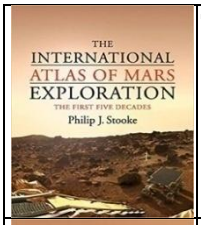
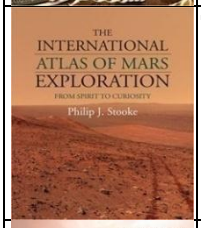
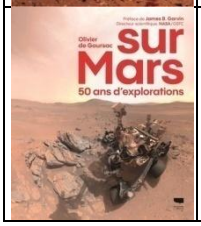
Sol et Lieux des Anniversaires des Rovers				
	Spirit (4 Janvier 2004)		Opportunity (24 Janvier 2004)	
Année	Sol	Lieu	Sol	Lieu
1	357	WP : Champagne	356	Bouclier Thermique
2	713	Lorre Ridge	711	Er : Overgaard
3	1068	HP : Troll	1067	Vic : Cape Desire
4	1424	HP : Winter Haven 3	1423	Vic : Duck Bay
5	1780	HP : Winter Haven 3	1779	Cratère Ranger
6	2135	HP : Troy	2134	Cratère Concepción
7			2489	CSM : Luis de Torres
8			2845	CY : Greeley Haven
9			3201	CY : Whitewater Lake
10			3556	CT : Pinnacle Island
11			3911	CT : James Grizzly Adams
12			4267	MV : Joseph Collin
13			4623	CT : Beacon Rock
14			4978	Perseverance Valley : Inde
WP : West-Pur **HP : Home Plate**			**Er : Erebus** **Vic : Victoria** **CT : Cape Tribulation** **CY : Cape York** **CSM : Cratère Santa Maria** **MV : Marathon Valley**	

RÉFÉRENCES WEB

GÉNÉRALE

- Site de la NASA
    - Mars Exploration : Sélection par mission
    https://mars.nasa.gov/mars-exploration/missions
    - Analyst's Notebook
    https://an.rsl.wustl.edu/
- Jet Propulsion Laboratory (JPL), California Institute of Technology
    - Le site du Photojournal :
    http://photojournal.jpl.nasa.gov/
    - Sélection par Planète :
    http://mars.jpl.nasa.gov/missions/
    - Sélection par les Missions :
    http://photojournal.jpl.nasa.gov/Help/PIADetQuery.html
    - Liste des images Raws
    http://marsrovers.jpl.nasa.gov/gallery/all/spirit.html
- ESA : Agence Spatiele Européenne
    http://www.esa.int/esaCP/France.html
- Malin Space Science Systems : Mars Globale Surveyore
    http://www.msss.com/mars_images/moc/themes/LANDINGS.html
- The Planetary Society :
    http://www.planetary.org/blogs/
- Midnight Planets.com :
    http://www.midnightplanets.com/web/MERB/sites.html
- Flashespace en direct du ciel et de l'espace
    http://www.flashespace.com/archives.htm
- Planète Terre (Ens de Lyon)
    http://planet-terre.ens-lyon.fr/planetterre/actualite_des_labos/dossiers/nouvelles-mars
- Nirgal : De la Planète Rouge à l'origine de la Vie, de Philippe Labrot
    http://www.nirgal.net/main.html
- PlaneteAstronomie.com
    http://www.planetastronomy.com/dossiers-astro/mars-dossier.htm
- Planète Mars
    http://solarnews.over-blog.com/ext/http://www.planete-mars.com/
- Orbite Mars
    http://orbitmars.futura-sciences.com/
- Astrocosmos.net
    http://www.astrocosmos.net/canvas.php?page=archive.php
- Le site Astronomie-Astronautique de JcBoulay
    http://jcboulay.free.fr/index.htm
- Archive du Forum UMSF (Unmanned Space Flight, fermé depuis janvier 2025)
    https://umsfarchive.com/index.php/index.php

- Wikipedia : Mars (Planète)
http://fr.wikipedia.org/wiki/Mars_(plan%C3%A8te)

	The International Atlas of Mars Exploration: Volume 1, Philip J. Stooke, Cambridge University Press 2012
	The International Atlas of Mars Exploration: Volume 2, Philip J. Stooke, Cambridge University Press 2014
	Sur Mars : 50 ans d'explorations martiennes, Olivier de Goursac, Delachaux et Niestlé 2026

VIKINGS

- Site de la Nasa
    - Viking 1 et 2
    https://mars.nasa.gov/mars-exploration/missions/viking-1-2/
    - Gaz Exchange and Labeled Release Experienter's
    https://nssdc.gsfc.nasa.gov/nmc/dataset/query.action?spacecraftName=Viking+1+Lander&experimentName=Biology+%28GEX%2FLR%2FPR%29
    - Viking Mission to Mars
    http://nssdc.gsfc.nasa.gov/planetary/viking.html
    - National Aeronautics and Space Administration (PDS)
    http://pds-imaging.jpl.nasa.gov/vikingl/vl_images.html
- The Martian Landscape
    http://history.nasa.gov/SP-425/contents.htm
- Nirgal : La Quête des Vikings, de Philippe Labrot
    http://www.nirgal.net/life.html
    Résultats de l'expérience Pyrolitic des atterrisseurs Viking
    https://www.nirgal.net/popup/viking_pyrolitic_release.html
    Résultats de l'expérience Gas Exchange des atterrisseurs Viking
    https://www.nirgal.net/popup/viking_gas_exchange.html
    Résultats de l'expérience Labeled Release des atterrisseurs Viking
    https://www.nirgal.net/popup/viking_labeled_release.html
- Viking Lander Labeled Release Experienter's Notebook
    https://pds-geosciences.wustl.edu/missions/vlander/lr.html

- Astrobiology Magazine : The Viking Files
http://www.astrobio.net/exclusive/480/the-viking-files#labeled_release
- Wikipedia : Programme Viking
http://fr.wikipedia.org/wiki/Programme_Viking

PATHFINDER

- Site de la Nasa
Mars Pathfinder
https://mars.nasa.gov/mars-exploration/missions/pathfinder/
- Nasa/JPL : Mars Pathfinder
http://mars.jpl.nasa.gov/MPF/index0.html
- Site miroir de Mars Pathfinder
http://www.iki.rssi.ru/mpfmirror/default.html
- Nirgal : Mars Pathfinder : la sonde et la mission, de Philippe Labrot
http://www.nirgal.net/pres_mpf1.html
- Voyage dans le Système Solaire : Mars Pathfinder, de Jean-Michel
http://jmm45.free.fr/sondes/marspath/marspath.htm
- Astrocosmos.net : Mars Pathfinder par Nicolas Rossels
http://www.astrocosmos.net/article/pathfinder.html
- AGU: Results From Mars Pathfinder: 21 September 2012, Last updated: 18 March 2018
https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/toc/10.1002/(ISSN)2169-9100.RESPATH1
- Wikipedia : Mars Pathfinder
http://fr.wikipedia.org/wiki/Mars_Pathfinder

SPIRIT ET OPPORTUNITY

- Jet Propulsion Laboratory (JPL), California Institute of Technology
  - Spirit Archive :
    http://marsrovers.jpl.nasa.gov/mission/status_spirit_2004.html
  - Spirit Raw Images :
    http://marsrovers.jpl.nasa.gov/gallery/all/spirit.html
  - Image Archive :
    http://www.jpl.nasa.gov/missions/mer/images.cfm
  - Opportunity Raw Images :
    http://marsrovers.jpl.nasa.gov/gallery/all/opportunity.html
  - Opportunity Archive :
    http://marsrovers.jpl.nasa.gov/mission/status_opportunity.html
  - Archive Vidéos :
    http://marsprogram.jpl.nasa.gov/gallery/video/
- Cornell University :
  - Pancam Home
    https://pancam.sese.asu.edu/panoramas.html
  - Athena Mars Exploration Rover : Steve Squyres

http://athena.cornell.edu/news/mubss/
http://athena1.cornell.edu/gallery/index.html
- Midnight Planets, Banque d'images par sol
http://www.midnightplanets.com/contents.html
- Qt Exploratorium edu : Index the image Spirit and Opportunity
http://qt.exploratorium.edu/mars/
- MER Radiometrically Calibrated Imagery
http://www.lyle.org/~markoff/Opportunity_pds_index_0281_0300.html
- The Planetary Society : Mars Exploration Rover (Emily Lakdawalla)
https://www.planetary.org/articles?keywords=mars-exploration-rovers
- The Road To Endeavour (Stuart Atkinson)
http://roadtoendeavour.wordpress.com/
- Martian Vistas (James Gauvin)
http://www.nivnac.co.uk/mer/index.php/opportunity/
- Blog Marsrovers Images (Damia Bouic)
http://www.db-prods.net/
- Nirgal : Mars Exploration Rover (MER), de Philippe Labrot
http://www.nirgal.net/rover_2003.html
- Planète Mars: Mars Exploration Rover de Gilles Dawidowicz
http://www.planete-mars.com/missions2003/mer/p_presentation.html
http://www.planete-mars.com/missions2003/mer/exploration/spirit04_1.html
- Planète Mars
https://planet-terre.ens-lyon.fr/ressources-meme-mot-cle?part=//Sciences%20de%20la%20Terre%20et%20de%20l%27Univers&urn=01&termes=&keyword=Opportunity
- Exploratorium : Journey to Mars
http://www.exploratorium.edu/mars/rovers.html
- MER Analyst's Notebook
http://an.rsl.wustl.edu/mer/
- MarsQuest Online : Rover Images
http://www.marsquestonline.org/mer/index.html
- Welcome to the Mars Exploration Rovers Portal to Observations (MER PORTAL)
https://mer-portal.spacescience.org/index.php
- Archive du Forum UMSF (Unmanned Space Flight, fermé depuis janvier 2025)
https://umsfarchive.com/index.php/viewforum.php?f=36
- AGU: Results From the Mars Exploration Rover Spirit and Opportunity Missions
https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/toc/10.1002/(ISSN)2169-9100.MERMISS1
- Application MarsLife pour voir les panoramas en virtuelle 3D (Perseverance, Curiosity, Spirit et Opportunity)
https://marslife.org/
- Wikipedia : Mars Exploration Rover
http://fr.wikipedia.org/wiki/Mars_Exploration_Rover
- 360Cities : réalité virtuelle à 360 degrés des panoramas
https://www.360cities.net/search/mars%20exploration%20rover%20/9?tab=panoramas&utf8=%E2%9C%93

PHOENIX

- Phoenix Mars Lander : Mission d'étude du Pole Nord de Mars
  http://phoenix.destination-orbite.net/#home
- Phoenix Mars Mission
  http://phoenix.lpl.arizona.edu/imageCategories_lander.php
- The Planetary Society :
  - Phoenix Sol-By-Sol Summary
    http://www.planetary.org/explore/topics/phoenix/sols.html
  - Phoenix Robotic Arm Camera (RAC) Raw Images
    http://www.planetary.org/data/phoenix/raw/
- Jet Propulsion Laboratory (JPL), California Institute of Technology : Phoenix Mars Lander
  http://www.jpl.nasa.gov/news/phoenix/main.php
- MER Radiometrically Calibrated Imagery
  http://www.lyle.org/~markoff/Opportunity_pds_index_0281_0300.html
- Texas A&M University : Dr. Mark Lemmon : Phoenix Surface Stereo Imager (SSI)
  http://www.met.tamu.edu/mars/color.html
- Planete Astronomy : Mars Phoenix Lander
  http://www.planetastronomy.com/dossiers-astro/mars-dossier.htm#PHOENIX
- Nirgal : Phoenix, de Philippe Labrot
  http://www.nirgal.net/phoenix.html
- Archive du Forum UMSF (Unmanned Space Flight, fermé depuis janvier 2025)
  https://umsfarchive.com/index.php/viewforum.php?f=14
- AGU: First Results From The Phoenix Mission to Mars updated: 18 March 2018
  https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/toc/10.1002/(ISSN)2169-9100.PHOENIX2
- Wikipedia : Phoenix Lander Mars
  http://fr.wikipedia.org/wiki/Phoenix_(sonde_spatiale)

Le premier Tome retrace l'histoire des six premières missions d'explorations spatiales qui ont réussi à se poser avec succès à la surface de la planète Mars. Le déroulement de chaque mission ainsi que les différentes découvertes scientifiques sont décrites de manière chronologique, et illustrée à l'aide des différents clichés panoramiques prises à la surface de la planète rouge entre les années 1976 et 2018. Participer vous aussi à cette extraordinaire aventure humaine axée sur la découverte de la surface d'un nouveau Monde.

Vikings - Pathfinder - Spirit - Opportunity - Phoenix